



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA  
BARCELONATECH

Escola Tècnica Superior d'Enginyeries  
Industrial i Aeronàutica de Terrassa

Trabajo de fin de grado  
**Grado en Ingeniería en Tecnologías Industriales**

# Estudio biomecánico computacional del cráneo de una salamandra común durante los mecanismos de alimentación

Zhen Wei Zhu Wu

**Director**

Lluís Gil. Departamento de Resistencia de Materiales y Estructuras en Ingeniería.

**Co-director:**

Josep Fortuny Terricabras. Instituto Catalán de Paleontología

**MEMORIA**

---

# TABLA DE CONTENIDOS

---

ANEXO DE FIGURAS.....	I
ANEXO DE ECUACIONES .....	III
ANEXO DE TABLAS .....	IV
ABREVIACIONES .....	V
AGRADECIMIENTOS .....	VI
RESUMEN .....	VII
1. INTRODUCCION.....	1
1.1    OBJECTO .....	1
1.2    ALCANCE .....	1
1.3    REQUISITOS MÍNIMOS.....	2
1.4    JUSTIFICACIÓN .....	2
2. ESTADO DEL METODO DE ELEMENTOS FINITOS.....	3
3. INTRODUCCION AL ANALISIS CON ELEMENTOS FINITOS .....	5
3.1    OBTENCION DE DATOS .....	5
3.2    MODELACION Y MEJORA DEL MODELO .....	7
3.3    ANALISIS CON ELEMENTOS FINITOS.....	8
4. ORIGEN DE LA MUESTRA.....	11
5. PROCEDIMIENTO PARA EL ANALISIS.....	13
5.1    RECONSTRUCCION EN 3D DEL CRANEO DE SALAMANDRA.....	13
5.1.1 Escaneo de la muestra.....	13
5.1.2 Reconstrucción con Avizo .....	14
5.1.3 Modelo final.....	16
5.2    PROCESO DE ADAPTACIÓN.....	17
5.2.1 Herramientas usadas en el software Geomagic Studio 2012.....	18
5.2.1.1 Reducción de sonido .....	19
5.2.1.2 Llenar agujeros.....	20
5.2.1.3 Reducción de triángulos .....	21
5.2.1.4 Relajación del modelo .....	22
5.2.1.5 Mesh Doctor .....	22

5.2.2 Características de la geometría a mantener .....	24
5.2.3 Adaptación de la geometría.....	25
5.2.3.1 Ciclo inicial .....	26
5.2.3.2 Ciclo medio .....	27
5.2.3.3 Ciclo pre-final .....	28
5.2.3.4 Cuarto final.....	29
5.2.4 Modelo final.....	30
5.3 PROCEDIMIENTO PARA REALIZAR FEA.....	33
5.3.1 Selección del material .....	34
5.3.2 Áreas de inserción muscular .....	35
5.3.3 Mallado de la geometría .....	40
5.3.4 Definición de las condiciones de contorno.....	42
5.3.4.1 Deducción de la transformación homotética .....	43
5.3.4.2 Escalado de fuerzas.....	44
5.3.4.3 Tipos de restricciones.....	45
5.3.4.4 Cargas en la mordida bilateral.....	47
5.3.4.5 Carga en la mordida unilateral.....	50
5.4 RESULTADOS .....	52
5.4.1 Partes de la salamandra a la hora de mencionar.....	52
5.4.2 Resultados de los análisis .....	53
5.4.2.1 Mordida bilateral anterior .....	53
5.4.2.2 Mordida bilateral posterior .....	56
5.4.2.3 Mordida unilateral anterior .....	59
5.4.2.4 Mordida unilateral anterior .....	62
5.5 DISCUSION DE LOS RESULTADOS.....	65
6. PLANIFICACIÓN .....	66
7. CONCLUSIONES.....	68
8. BIBLIOGRAFÍA.....	69
8.1 PÁGINAS WEB .....	69
8.2 PDF .....	69
8.3 Artículos .....	69

## ANEXO DE FIGURAS

---

<b>Figura 2.1</b> Resultado comparativo en 2D de 4 modelos de animales diferentes. Fuente:(Marcé Nogué et al., 2013) .....	4
<b>Figura 2.2</b> Análisis 3D del cráneo de un caimán. Fuente: Jordi Marcé .....	4
<b>Figura 3.1</b> Partes de un TC. Fuente: WIKIPEDIA.....	6
<b>Figura 3.2</b> Funcionamiento TC. Fuente: <a href="http://www.drgen.com.ar/2012/11/como-funciona-tomografo/">http://www.drgen.com.ar/2012/11/como-funciona-tomografo/</a> .....	7
<b>Figura 3.3</b> División en elementos simples para análisis en FEM. Fuente: Jordi Marcé Nogué.....	8
<b>Figura 4.1</b> Distribución geográfica de la salamandra común. Fuente: Wikipedia ....	11
<b>Figura 4.2</b> Fotografía salamandra. Fuente: WEB IUCN.....	12
<b>Figura 4.3</b> Situación de la salamandra en IUCN. Fuente: IUCN .....	12
<b>Figura 5.1</b> Escáner del ICP. Fuente: Jordi Marcé Nogué .....	14
<b>Figura 5.2</b> Reconstrucción sin thresholding Fuente: Propia .....	15
<b>Figura 5.3</b> Avizo durante la utilización de Multi-Thresholding. Fuente: Propia.....	15
<b>Figura 5.4</b> Izquierda: Corte TC. Derecha: Corte respecto a la totalidad del cráneo. Fuente: Propia .....	16
<b>Figura 5.5</b> Modelo final STL. Fuente: Propia .....	16
<b>Figura 5.6</b> Modelo sin retocar en Geomagic Studio 2012. Fuente: Propia.....	18
<b>Figura 5.7</b> Procesos de adaptación. Fuente: Jordi Marcé Nogué .....	19
<b>Figura 5.8</b> Comparación modelo antes y después de reducción de sonido. Fuente: Propia.....	19
<b>Figura 5.9</b> Antes y después de utilizar el llenado de agujeros. Fuente: Propia.....	20
<b>Figura 5.10</b> Variación en el número de triángulos. Fuente: Propia .....	21
<b>Figura 5.11</b> Antes y después de relajar. Fuente: Propia.....	22
<b>Figura 5.12</b> Aspectos que tiene en cuenta Mesh Doctor. Fuente: Propia .....	23
<b>Figura 5.13</b> Antes y después de Mesh Doctor. Fuente: Propia.....	23
<b>Figura 5.14</b> Características a mantener. Fuente: Propia .....	24
<b>Figura 5.15</b> Primero arreglo. Fuente: Propia .....	25
<b>Figura 5.16</b> Zonas arregladas. Fuente. Propia .....	26
<b>Figura 5.17</b> Primero ciclo después de aplicar todas las herramientas. Fuente: Propia .....	27
<b>Figura 5.18</b> Segundo ciclo de la adaptación. Fuente: Propia .....	28
<b>Figura 5.19</b> Tercer ciclo de adaptación. Fuente: Propia .....	29
<b>Figura 5.20</b> Cuarto ciclo adaptación. Fuente: Propia.....	30
<b>Figura 5.21</b> Adaptación final. Fuente: Propia .....	31

<b>Figura 5.22</b> Modelo en NURBS. Fuente: Propia.....	32
<b>Figura 5.23</b> Modelo CAD. Fuente: Propia.....	32
<b>Figura 5.24</b> Interfaz de Ansys® con lo necesario para hacer FEA. Fuente: Propia .....	33
<b>Figura 5.25</b> Musculatura salamandra gigante china .....	36
<b>Figura 5.26</b> Inserción del musculo AME .....	37
<b>Figura 5.27</b> Inserción AML .....	37
<b>Figura 5.28</b> Fijación de los dientes.....	38
<b>Figura 5.29</b> Fijación de restricción de movimiento.....	39
<b>Figura 5.30</b> Mallados con medidas diferentes. Fuente: Propia .....	41
<b>Figura 5.31</b> Fijación cóndilo. Fuente: Propia .....	46
<b>Figura 5.32</b> Fijación articulación mandíbula. Fuente: Propia .....	46
<b>Figura 5.33</b> Fijación más real articulación mandíbula. Fuente: Propia.....	47
<b>Figura 5.34</b> Fijación más real cóndilo. Fuente: Propia.....	47
<b>Figura 5.35</b> Fuerzas y fijación bilateral de arriba. Fuente: Propia.....	48
<b>Figura 5.36</b> Fuerza y fijación bilateral de abajo. Fuente: Propia .....	48
<b>Figura 5.37</b> Fuerza y fijación mordida bilateral posterior de abajo. Fuente Propia..	49
<b>Figura 5.38</b> Fuerzas y fijación de mordida bilateral posterior de arriba. Fuente: Propia .....	49
<b>Figura 5.39</b> Fuerzas y fijación de mordida unilateral anterior desde arriba. Fuente: Propia .....	50
<b>Figura 5.40</b> Fuerzas y fijación mordida unilateral anterior desde arriba. Fuente: Propia .....	50
<b>Figura 5.41</b> Fuerza y fijación mordida unilateral posterior abajo. Fuente: Propia ...	51
<b>Figura 5.42</b> Fuerza y fijación mordida unilateral posterior arriba. Fuente: Propia ...	51
<b>Figura 5.43</b> Nombre de las partes del cráneo. Fuente: Propia .....	52
<b>Figura 5.44</b> Tensiones mordida bilateral anterior. Fuente: Propia .....	54
<b>Figura 5.45</b> Deformación mordida bilateral. Fuente: Propia .....	55
<b>Figura 5.46</b> Esfuerzos mordida bilateral posterior. Fuente: Propia .....	57
<b>Figura 5.47</b> Deformaciones mordida bilateral posterior. Fuente: Propia .....	58
<b>Figura 5.48</b> Esfuerzo mordida unilateral anterior. Fuente: Propia.....	59
<b>Figura 5.49</b> Esfuerzos II mordida unilateral anterior. Fuente: Propia.....	60
<b>Figura 5.50</b> Deformación mordida unilateral anterior. Fuente: Propia.....	61
<b>Figura 5.51</b> Esfuerzos mordida unilateral posterior. Fuente: Propia .....	63
<b>Figura 5.52</b> Deformaciones mordida unilateral posterior. Fuente: Propia .....	64
<b>Figura 6.1</b> Gant. Fuente: Propia.....	67

## ANEXO DE ECUACIONES

---

<b>Ecuación 3.1</b> Ecuaciones de equilibrio .....	9
<b>Ecuación 3.2</b> Principio de los desplazamientos virtuales .....	9
<b>Ecuación 3.3</b> Ecuación obtenida de la integral .....	9
<b>Ecuación 3.4</b> Tensor de deformaciones.....	10
<b>Ecuación 3.5</b> Tensor de tensiones.....	10
<b>Ecuación 5.1</b> Matriz Jacobiana de transformación homotética.....	43
<b>Ecuación 5.2</b> Valor de $\alpha$ .....	43
<b>Ecuación 5.3</b> Relación que hay que cumplir para mantener la homotecia .....	43
<b>Ecuación 5.4</b> Relación entre los dos modelos en función de $\alpha$ .....	44
<b>Ecuación 5.5</b> Relación final de fuerzas. ....	44

## ANEXO DE TABLAS

---

<b>Tabla 5.1</b> Características de los mallados. Fuente: Propia .....	42
<b>Tabla 5.2</b> Tabla de fuerzas de las salamandras .....	44
<b>Tabla 5.3</b> Área de los músculos y tensiones.....	45
<b>Tabla 5.4</b> Nombres de las partes del cráneo .....	53
<b>Tabla 6.1</b> Tabla para el Gant.....	67

## ABREVIACIONES

---

**CAD.** Computer-Aided Design

**ICP.** Instituto catalán de paleontología

**FEA.** Finite Element Analysis

**ICTP.** International Centre for Theoretical Physics

**TC.** Tomografía computada

**NURBS.** Non-Uniform Rational B-Splines.



## AGRADECIMIENTOS

---

A toda la gente que me ha ayudado.

A Jordi Marcé Nogué y a Josep Fortuny Terricabras por toda la ayuda ofrecida, y estar dispuestos a cualquier hora contestando a todas las dudas y problemas que me salía, sobre todo a Jordi que aunque se haya ido a Alemania, me ha seguido ayudando con el proyecto.

## RESUMEN

---

En este estudio se realizarán los pasos de reconstrucción, adaptación y análisis mediante métodos finitos de un cráneo de salamandra para saber el funcionamiento del mecanismo de alimentación. Se han insertado lo más parecido a la realidad posible las áreas de los músculos y de las condiciones de contorno, para así obtener unos resultados que se asemejen lo más a la realidad posible. Aunque el cráneo tendrá ciertas pérdidas de información debido a su escaneo y a su posterior adaptación, aunque se realizará todo lo posible para mantener las características. Además se utilizarán estudios similares a este para poder fijar las condiciones de contorno, así como las áreas musculares y sus direcciones.

# 1. INTRODUCCION

## 1.1 OBJETO

El objeto de este estudio es el análisis y reconstrucción de un cráneo de salamandra, se utilizará técnicas de reconstrucción de ingeniería inversa y métodos computacionales de simulación para poder a posteriori construir un modelo computacional de tres dimensiones en el cual puedan ser estudiados los mecanismos que utiliza una salamandra para alimentarse.

## 1.2 ALCANCE

Reunión con el tuto de TFG

Lectura del estado del arte

Autoaprendizaje de los softwares a utilizar

Puesta en punto del modelo a analizar en 3D

Inserción muscular

Análisis del modelo 3D con elementos finitos

Análisis de resultados obtenidos

Visita al instituto catalán de paleontología

Comparativa entre condiciones de contorno

Elaboración de documentos del proyecto

### 1.3 REQUISITOS MÍNIMOS

Al tratarse de un estudio virtual donde se buscan resultados de simulación, este no tiene que cumplir ningún requisito económico, técnico, social o legal. Pero los requisitos que tiene que cumplir a la hora de realizar este estudio es que el resultado obtenido mediante las diferentes técnicas para obtener el modelo 3D, sea un modelo que tenga una cualidad suficiente para que al realizar un análisis se puedan obtener resultados bastantes reales.

### 1.4 JUSTIFICACIÓN

Este estudio tiene la colaboración del instituto catalán de paleontología (ICP) donde se requiere el estudio de los mecanismos de la salamandra a la hora de alimentarse. Se puede decir que gracias al estudio de elementos finitos se puede estudiar estructuras de carácter biológico, y no solo de carácter estructural, de esta manera se puede comprobar la evolución del organismo sujeto a una función concreta o la adaptación de dicha función.

Estos estudios no llevan mucho tiempo en activo debido a la complejidad que tenían las estructuras óseas de los animales a la hora de crear un modelo 3D y el elevado coste debido a que aún no existían programas como ANSYS® 15.0. Por eso gracias a la gran evolución que ha tenido la informática en estos últimos años se ha podido llegar a realizar estudios que se asemejan mucho a la realidad y en un tiempo relativamente corto, así entonces se pueden estudiar con gran frecuencia estructuras de diferentes animales.

Las nuevas tecnologías que han aparecido como la tomografía computada, han permitido crear modelos 3D con diferentes herramientas y con una precisión bastante alta para poder realizar estudios con más calidad.

Sin embargo se ha de tener en cuenta que a la hora de escanear estructuras óseas pueden llegar a producirse errores, debido a los procesos o aproximaciones a la hora de realizar el tratamiento de los modelos 3D con los diferentes softwares disponibles. En estas aproximaciones se pueden llegar a perder mucha información, pero siempre se realiza el estudio intentando alterar lo mínimo posible, para poder así unos resultados que se asemejen a la realidad.

## 2. ESTADO DEL METODO DE ELEMENTOS FINITOS

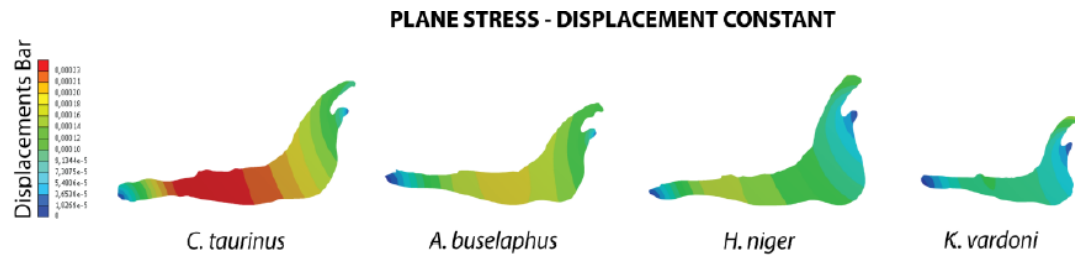
El análisis mediante elementos finitos es una técnica que se usa sobre todo en ingeniería. El método es un método numérico que aproxima soluciones de ecuaciones parciales, es un método pensado sobre todo para usarse en computadoras que permite resolver un problema con geometrías complicadas, el método se usa tanto en diseños industriales como en simulación de procesos físicos y biológicos como el que se tiene para analizar.

En el campo de la ingeniería es una técnica que se utiliza desde hace más de 30 años, a pesar de que en el campo del análisis biológico no se comenzó a usar hasta más bien los 90, principalmente debido a la falta de capacidad computacional y a la geometría compleja a estudiar. Durante los últimos años se han podido realizar análisis con el método de los elementos finitos con gran precisión debido a la evolución en el campo de la informática además del bajo coste de los ordenadores hoy en día.

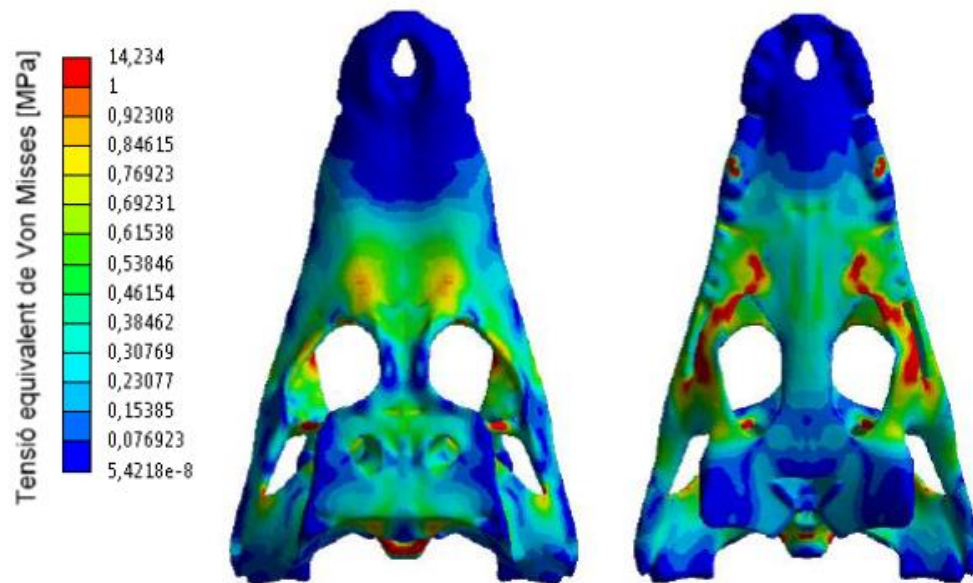
Además, del lado tanto biológico como paleontológico, la obtención de datos a partir de la tomografía computada para el estudio de elementos finitos es una herramienta muy útil si se compara con la obtención de ellos mediante el láser, ya que una tomografía permite la obtención de la estructura interna del hueso. A parte es una técnica que no altera la pieza a analizar por lo que se podrá analizar tanto animales extinguidos como no extinguidos sin ningún problema. Es más, aparte de ser una técnica no invasiva, el hecho de poder reconstruir geometrías tan complicadas como los huesos de los animales permite recrear deformaciones y tensiones con una gran precisión, convirtiéndolo en una técnica muy eficiente.(Rayfield, 2007).

Pero aún siguen habiendo problemas a la hora de realizar estos estudios mediante elementos finitos, y es la caracterización de las propiedades de los materiales óseos tanto de animales extinguidos como no. Por eso en muchos casos se asumen propiedades similares de estudios realizados con anterioridad, en función de las propiedades internas del tejido o de su proximidad filogenética.

Actualmente se realizan análisis de elementos finitos con modelos más sencillos en 2D (Marcé Nogué, Demiguel, Fortuny, Esteban-trivigno, & Gil, 2013) y de más complicados en 3D (Marcé Nogué, Fortuny, Gil, & Galobart, 2011).



**Figura 2.1** Resultado comparativo en 2D de 4 modelos de animales diferentes. Fuente: (Marcé Nogué et al., 2013)



**Figura 2.2** Análisis 3D del cráneo de un caimán. Fuente: Jordi Marcé

De esta manera existen cada vez más estudios que no solo se realizan para el estudio de un solo animal, sino que también se realizan para hacer comparativas entre unos y otros, convirtiéndose en una técnica cada vez más habitual para hacer conclusiones de evolución morfológica o funcional de los huesos.

### **3. INTRODUCCION AL ANALISIS CON ELEMENTOS FINITOS**

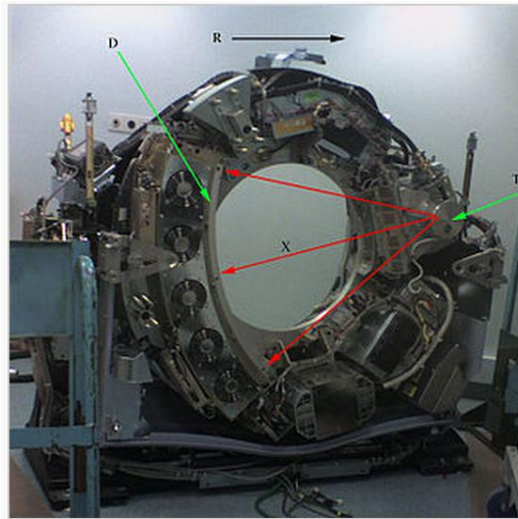
Cuando se empieza a realizar un estudio sobre una estructura biológica hay diversos factores que se tiene que tener en cuenta. Principalmente se querrán obtener resultados para extraer conclusiones biológicas o realizar comparativas con otros animales similares. Por eso el análisis obtenido a partir del modelo real se han de realizar con una gran precisión así como la obtención de los datos del modelo tiene que ser tan preciso como se pueda.

Los pasos que se han de realizar a la hora de hacer un estudio de elementos finitos son: la obtención del modelo a partir de tomografías y su reconstrucción con Avizo a posteriori, la modelación y mejora del modelo del mismo con Geomagics, y por último la ejecución del Ansys para realizar el estudio de elementos finitos. A continuación se explicaran los pasos que hemos señalado previamente.

#### **3.1 OBTENCION DE DATOS**

El primero paso que se debe de hacer al analizar un cuerpo biológico mediante el método de los elementos finitos, es la obtención de los datos que se quieren analizar. Para poder obtener este modelo es muy importante obtener un modelo muy preciso tanto de los huesos como de su estructura interna. Es por eso que se ha utilizado una herramienta que es la tomografía computada (TC) para la obtención de estos.

Como ya se ha citado anteriormente el modelo 3D del cráneo de salamandra ha sido obtenido mediante un TC que es una herramienta bastante precisa, así como no invasiva, de esta manera no se estropeará nuestro modelo, ya que se podrá escanear el modelo sin romperlo, en este mismo apartado hablaremos también de lo que es una tomografía computada y su funcionamiento.



Interior de un tomógrafo axial

computarizado. Leyenda:

D: detectores de radiación.

T: tubo emisor de rayos X.

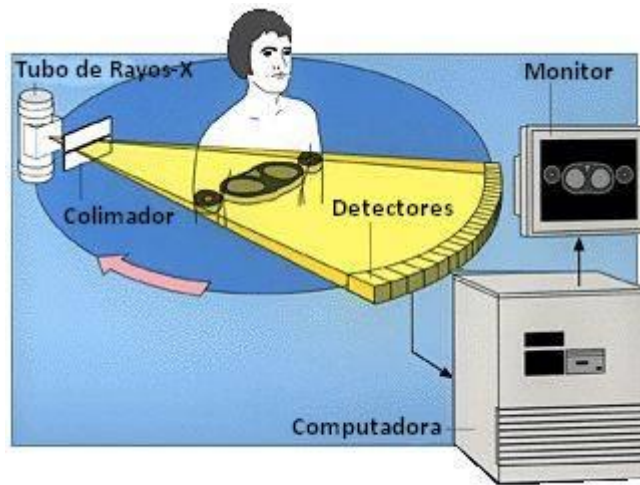
X: haz de rayos X.

R: rotación del "gantry".

**Figura 3.1** Partes de un TC. Fuente: WIKIPEDIA

La tomografía computada (TC) es un procedimiento que usa rayos X para obtener imágenes detalladas como cortes o secciones de objetos anatómicos. El TC es un aparato que emite un haz de rayos X que incide sobre el objeto, la radiación que no absorbe el cuerpo es recogida por unos detectores. Se realizan múltiples cortes a una misma distancia pero cambiando su orientación hasta que el espectro da una vuelta entera, estas imágenes son sumadas y el ordenador realiza un promedio de los datos recogidos. Una vez recogida el primer plano se cambia el espectro moviéndolo a una distancia muy corta para crear un segundo plano. Así se recogen imágenes bidimensionales que permiten ver secciones del objeto a cualquier ángulo.





**Figura 3.2** Funcionamiento TC. Fuente: <http://www.drngen.com.ar/2012/11/como-funciona-tomografo/>

Actualmente, existen muchos tipos de escáner de tomografía computada, que proporcionan diferentes tipos de precisión. Se usan tomógrafos para escáneres médicos, que es una de las cosas más habituales, también para procesos industriales o estudios biológicos como es nuestro caso. Así como dependiendo del uso de los escáneres, la precisión puede ir de milímetros hasta micrómetros. Se puede decir entonces que para la hora de elegir un escáner es muy importante debido a la precisión de este a la hora de escáner los objetos. Si el objeto escaneado es muy preciso se podrán obtener unos resultados, con el método de los elementos finitos, muy buenos ya que serían más fiables y más cercanos a la realidad. La precisión va ligada a las dimensiones de la muestra, normalmente mayor precisión requiere más muestras, por lo que tendría un coste muy alto, así que normalmente se opta por un equilibrio entre precisión, precio y dimensión de resultados.

### 3.2 MODELACION Y MEJORA DEL MODELO

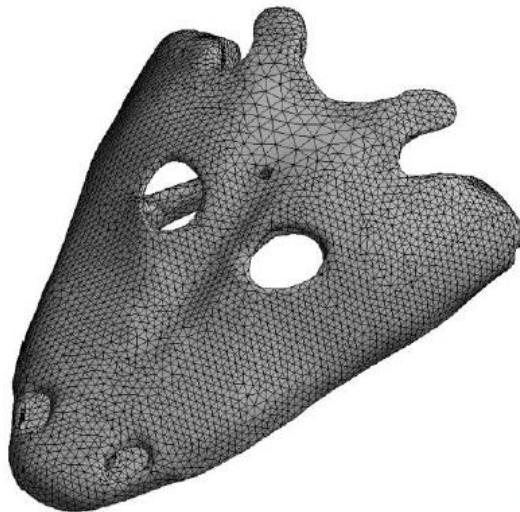
La ingeniería inversa es el proceso por el cual se invierten los pasos normales a seguir en ingeniería. El objetivo es obtener información o un diseño, con el fin de determinar información tales como descubrir los principios tecnológicos por los cuales se rige analizando su estructura, su función o a la forma de operar pero de forma inversa a como se haría en ingeniería, en el cual se utilizan datos técnicos para elaborar un producto elaborado.

Este proceso se ha utilizado en diversos campos, que iniciaron en copiar un producto y que posteriormente lo optimizaron o crearon uno nuevo a partir de estos. Uno de estos sectores fue la industria militar, ya que esta herramienta apareció en la segunda guerra mundial, que mejora los productos militares a partir de materiales que eran incautados de los enemigos. Otro de las industrias es la industria tecnológica, como algunas empresas que utilizan este sistema para mejorar aparatos electrónicos que consiguen de sus competencias.

Aquí se utiliza la ingeniería inversa para analizar un modelo en 3D, que en nuestro caso es una estructura biológica que previamente ha sido escaneado por TC, para así entender su funcionamiento.

### 3.3 ANALISIS CON ELEMENTOS FINITOS

El análisis de los elementos finitos es una herramienta de simulación que utiliza el método de los elementos finitos. El método de los elementos finitos es un método que utilizar unas condiciones de contorno para llegar a unas conclusiones mediante la aproximación a problemas continuos, y se llega a transformar un problema de geometría compleja en un modelo más simple. El conocimiento de lo que sucede en modelo aproximado se obtiene mediante la interpolación de valores conocidos en los nodos mediante ecuaciones diferenciales.



**Figura 3.3** División en elementos simples para análisis en FEM. Fuente: Jordi Marcé Nogué

El análisis mediante el método de los elementos finitos se usará las ecuaciones de la mecánica de medios continuos. Primero se calcularán los desplazamientos con las ecuaciones de equilibrio:

$$\begin{aligned}\frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} + b_x &= 0 \\ \frac{\partial \sigma_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} + b_y &= 0 \\ \frac{\partial \sigma_{zz}}{\partial z} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + b_z &= 0\end{aligned}$$

**Ecuación 3.1** Ecuaciones de equilibrio

Aunque el problema debería estar formulado en una forma que varíe (fórmula integral):

$$\iiint_V \delta \underline{\varepsilon}^T \underline{\sigma} dV = \iiint_V \delta \underline{a}^T \underline{f}^B dV + \iint_S \delta \underline{a}^T \underline{f}^S dS + \sum \delta \underline{a}_i^T \underline{r}_i$$

**Ecuación 3.2** Principio de los desplazamientos virtuales

Esta ecuación dará a una ecuación para un problema de algebra lineal:

$$[K] \{u\} = \{f\}$$

**Ecuación 3.3** Ecuación obtenida de la integral

Una vez se tienen los desplazamientos con la ecuación anterior, se obtiene el tensor de deformaciones:

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right)$$

**Ecuación 3.4** Tensor de deformaciones

Una vez se tiene el tensor de deformaciones, con las ecuaciones constitutivas se calcula el tensor de tensiones:

$$\underline{\underline{\sigma}} = \underline{\underline{E}} \underline{\underline{\varepsilon}}$$

**Ecuación 3.5** Tensor de tensiones

Observando este proceso, se puede ver que un análisis mediante elementos finitos se puede observar diferentes etapas, concretamente 3 etapas: el pre-proceso, el proceso de cálculo y el post-proceso.

En el caso de este estudio, lo primero que se obtiene son los datos mediante una técnica de escaneo como la tomografía, para poder recrear el modelo 3D en el ordenador. Una vez obtenido el modelo 3D, este se somete a unas series de remodelaciones y correcciones para corregir posibles errores de reconstrucción debido al escaneo o a la propia muestra. Posteriormente se divide el modelo en un número finito de elementos interconectados. A estos elementos se le asignan las propiedades del material y se le aplican unas condiciones de contorno.

A continuación se somete al análisis por el método de los elementos finitos, teniendo en cuenta la geometría, las condiciones de contorno y el material que se usa. Este calcula los desplazamientos, y a partir de estos valores consigue las tensiones y deformaciones.

Una vez obtenido los resultados, el post-proceso consiste en la verificación de los resultados con herramientas de convergencia para saber la precisión, que se llevan a cabo con su interpretación y representación.

#### 4. ORIGEN DE LA MUESTRA

La muestra a analizar es una salamandra común que ha sido proporcionado por el Instituto Catalán de Paleontología, que se dedican a la investigación y educación sobre los animales, sobre todo al estudio de vertebrados prehistóricos, la evolución de primates y el desarrollo de la geología y fauna durante el Neógeno.

La salamandra común es un anfibio urodelo (con cola), de aspecto grande y robusto que normalmente mide entre 12 y 23 cm, su cabeza es tan ancha como larga, y con el morro normalmente redondeado, en su cabeza tiene unos abultamientos grandes llamados glándulas parótidas. Sus ojos son grandes y saltones, con el iris negro. Tiene una cola que no sobrepasa la longitud de su cuerpo y cabeza juntos. Esta muestra tiene un tamaño del cráneo de aproximadamente 20mm de largo por 20mm de amplitud.



**Figura 4.1** Distribución geográfica de la salamandra común. Fuente: Wikipedia

El hábitat de esta especie se extiende por casi toda la región Paleártica Occidental. Por Europa se extiende desde el Atlántico, hasta Ucrania, los países Balcanes y Grecia. Y presente en Asia Menor occidental hasta Kurdistán.

Su hábitat normal se encuentra en sitios húmedos, como en bosques húmedos con arroyos o sombras, también se pueden encontrar en laderas rocosas, matorrales densos o zonas con mucha vegetación, es decir sitios que son normalmente húmedos.



Figura 4.2 Fotografía salamandra. Fuente: WEB IUCN

La salamandra es nocturna y come todo tipo de insectos e incluso hasta arañas. Estas tiene un mecanismo de defensa contra sus depredadores que es la toxicidad que desprende, este veneno sale de sus glándulas parótidas, que incluso puede llegar a rociar a sus depredadores moderadamente para desalentar el ataque.

Aunque la salamandra está en preocupación menor, su población ha decrecido considerablemente, debido a incendios, deforestación, contaminación de las aguas.

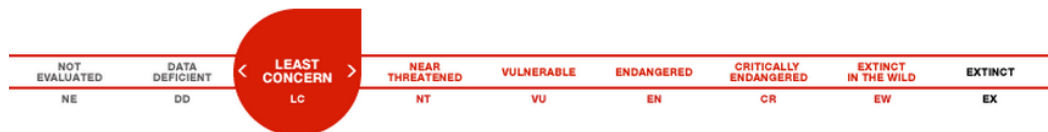


Figura 4.3 Situación de la salamandra en IUCN. Fuente: IUCN

## **5. PROCEDIMIENTO PARA EL ANALISIS**

Como ya se ha mencionado anteriormente, el modelo ha sido facilitado por el ICP, y a partir de allí se han realizado tres etapas para obtener resultados relacionados con los mecanismos de alimentación de una salamandra. La primera fase será la de la recreación en 3D del cráneo, el segundo paso será la adaptación y el último será el análisis mediante el método de los elementos finitos.

### **5.1 RECONSTRUCCION EN 3D DEL CRANEO DE SALAMANDRA**

Para la obtención del modelo en forma 3D previamente se han de obtener los datos pertenecientes a la geometría del cráneo. Después de obtener estos datos, son introducidos en el ordenador para poder obtener el cráneo propiamente dicho en forma 3D digitalmente. A continuación se explicará los procedimientos realizados para la obtención del cráneo.

#### **5.1.1 Escaneo de la muestra**

Para la reconstrucción del cráneo en forma digital, lo primero que se hizo fue el escaneo del cráneo en el ICTP de Trieste, en Italia, mediante un escáner TC de alta resolución. Estos dispositivos tienen una precisión de unas 100 micras, y están acostumbrados a ser utilizados para escanear muestras del orden de decímetros.

El escáner del ICTP de Trieste podría ser un escáner parecido al escáner de la foto que se muestra a continuación, que es el escáner que hay en el Instituto Catalán de Paleontología.





**Figura 5.1** Escáner del ICP. Fuente: Jordi Marcé Nogué

Para el escaneo de la muestra, la mejor manera es que la pieza este colocada de tal forma que quede longitudinalmente alineada con el eje vertical.

### 5.1.2 Reconstrucción con Avizo

Después de la obtención de datos, se procesaron los datos para la reconstrucción mediante el software Avizo 7.1 en un sistema operativo Windows 8 de 64 bits, 8 Gb de memoria RAM y procesador Intel® Core™ i7-4700MQ de 2.40 GHz. Se realizó la segmentación de imágenes Multi-Thresholding mediante los cortes obtenidos por TC.

La segmentación de imágenes asigna a cada pixel de la imagen una etiqueta donde describe a que región pertenece. Con este procedimiento se obtendrían la generación de superficies.

A parte, el thresholding es un proceso que es aplicado a la segmentación de imágenes con el fin de eliminar aquellas densidades que son captadas por el escáner pero que no interesan debido a que no sirven para la reconstrucción del cráneo.



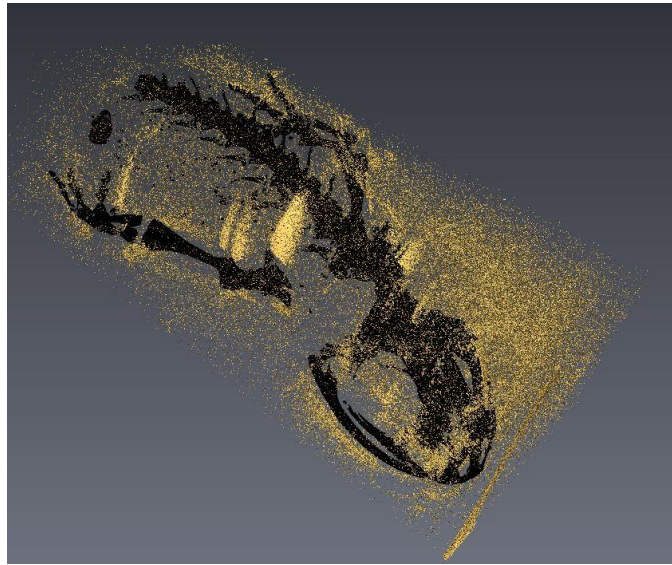


Figura 5.2 Reconstrucción sin thresholding Fuente: Propia

En la imagen se puede observar que si no usamos el thresholding podemos captar densidades que no nos interesan a la hora de reconstruir el cráneo y tardaríamos mucho utilizando otras herramientas para corregirlo.

El Multi-Thresholding es un método de segmentación en el cual se puede seleccionar el material fijando diferentes límites de densidades, pudiendo así elegir el material necesario para la reconstrucción craneal, aunque es bastante difícil escoger toda la información útil para la reconstrucción craneal llegando incluso a perder cierta información. En la siguiente imagen se puede ver como reconstruye Avizo con Multi-Thresholding.

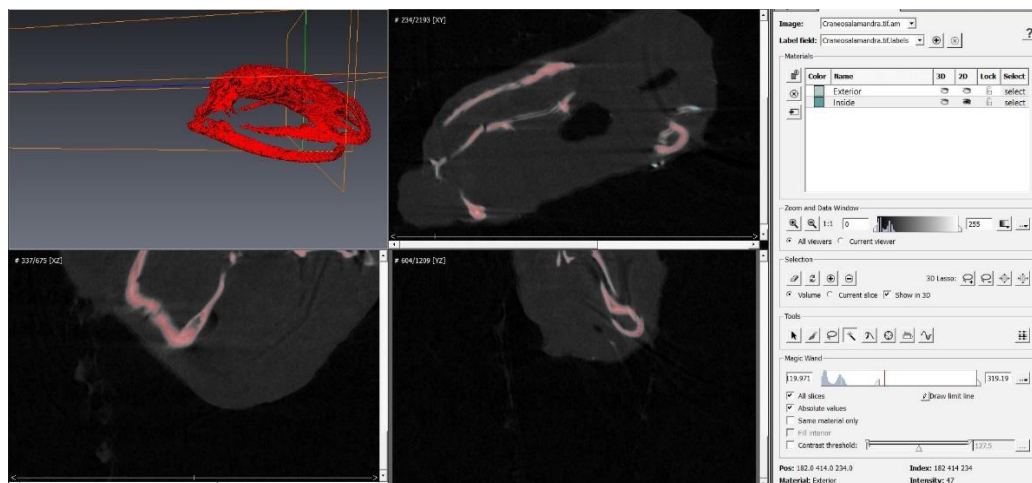
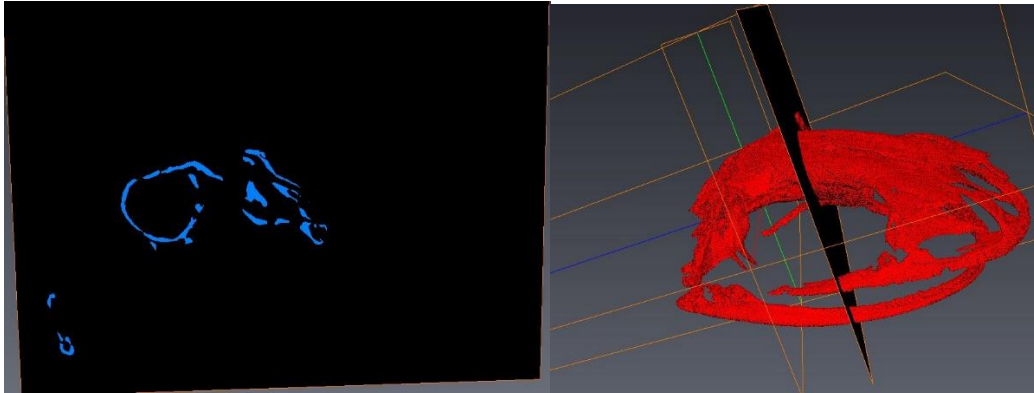


Figura 5.3 Avizo durante la utilización de Multi-Thresholding. Fuente: Propia

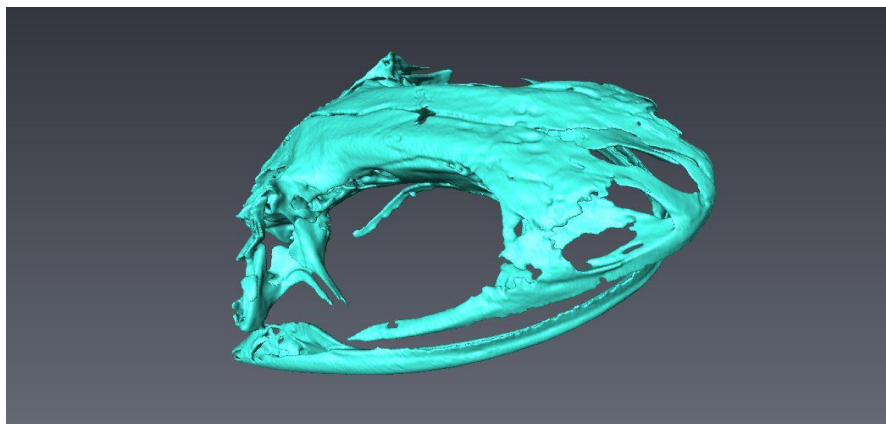
Una vez seleccionadas las densidades que corresponden al cráneo, si se seleccionan todos los cortes correspondientes en función del rango de densidades escogido se reconstruye el cráneo. En la siguiente figura se ve un corte de un trozo del cráneo.



**Figura 5.4** Izquierda: Corte TC. Derecha: Corte respecto a la totalidad del cráneo. Fuente: Propia

### 5.1.3 Modelo final

Finalmente se obtiene un modelo del cráneo por Multi-Thresholding, que se puede observar en la figura que se pone a continuación. Después de su creación en Avizo se guarda como formato STL (Stereolithography) que es uno de los formatos para la creación de CAD y prototipos que tiene Avizo. Este tipo de archivos guarda la recreación en 3D en forma de triángulos, además que es un formato universal que puede ser abierto por cantidad de softwares, de modo que podrá ser abierto con el siguiente programa que se utilizara para la recreación del modelo 3D.



**Figura 5.5** Modelo final STL. Fuente: Propia

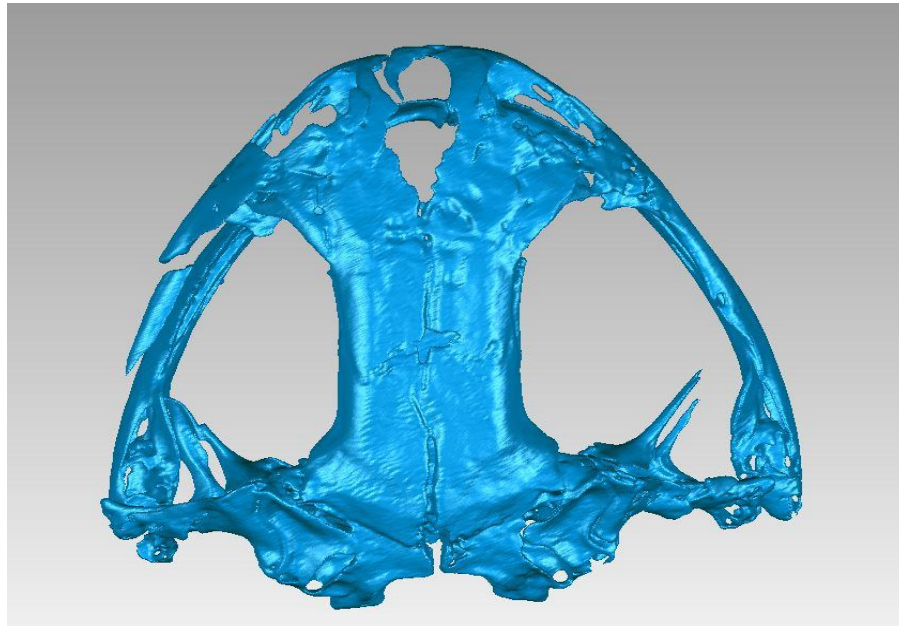
En el momento de escaneo de la muestra, se escaneo gran parte de la salamandra, como la mandíbula superior, las articulaciones anteriores y parte de la columna, pero como en este análisis solo vamos a tratar el mecanismo de alimentación escogeremos el cráneo, pero no lo escogeremos entero ya que como se va a realizar un análisis estático estructural. A la hora de escoger hay diversas controversias sobre si es mejor una u otra, pero finalmente se ha escogido el cráneo superior debido a las condiciones de contorno facilitados por Jordi Marcé Nogué y Josep Fortuny, en uno de sus artículos, además de que el cráneo al ser una estructura más compleja aportaría más información a la hora de ser analizada.

## 5.2 PROCESO DE ADAPTACIÓN

Una vez se tiene la reconstrucción del cráneo, y se ha guardado como archivo STL, para poder ser pasados a otros softwares y poder hacerle diversas operaciones como la reducción del sonido o corrección de diversos errores en el modelo, debidos a la precisión del escaneo TC o a la reconstrucción en Avizo.

Para poder llevar estas operaciones de corrección, para este modelo se ha utilizado el software de ingeniería inversa Geomagic Studio 2012, que es un programa que crea modelos digitales a partir de modelos existentes escaneados. Este programa además permite el desarrollo de otros productos, de esta manera Geomagic Studio 2012 transforma la red de polígonos del modelo escaneado en un modelo CAD que posteriormente se utilizara en otros softwares, en este caso el software Ansys para el análisis del FEA.

El fichero que tenemos en Geomagic Studio, es un fichero que ha sido transportado de Avizo, y que tiene la siguiente forma:



**Figura 5.6** Modelo sin retocar en Geomagic Studio 2012. Fuente: Propia

La geometría inicial es de un cráneo con mandíbula inferior compuesto por 3716010 triángulos y un fichero con un tamaño de 138 Mb, como se puede observar en la figura tiene un gran número de rugosidades así como un gran número de agujeros, como si esta salamandra hubiera recibido un gran impacto con algún material bastante duro, según Josep Fortuny codirector de este trabajo, este animal igual murió de algún gran impacto con alguna roca o algo parecido, porque está muy “desfigurado” el cráneo, la gran rugosidad del modelo y el gran número de agujeros que tiene ha hecho que la reconstrucción haya sido una etapa bastante costosa de realizar a la hora de poder corregir irregularidades. Y es una de las etapas que más tiempo se ha dedicado a la hora de poder adaptar el modelo para la siguiente fase.

### **5.2.1 Herramientas usadas en el software Geomagic Studio 2012.**

Las principales herramientas de Geomagic Studio 2012 para el proceso de adaptación son: reducción de sonido, reparación manual, reducción de triángulos, relajación del modelo y la reparación automática. Estas herramientas de se han ido repitiendo hasta conseguir un modelo que pueda ser utilizado para el análisis mediante FEA.

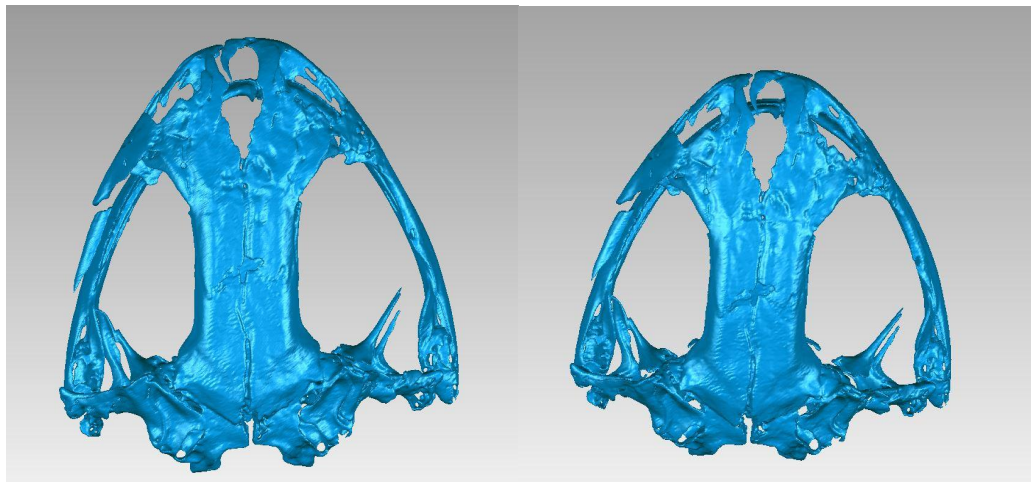


**Figura 5.7** Procesos de adaptación. Fuente: Jordi Marcé Nogué

Estas operaciones, en el proceso de adaptación se han ido aplicando repetidamente con el objetivo de poder crear un modelo para realizar el análisis FEA, eso sí siempre controlando que no haya pérdidas importantes de información al aplicarlas. A continuación se explicara cada una de las herramientas y los pequeños cambios que se aprecian al aplicarlas.

#### 5.2.1.1 Reducción de sonido

Esta herramienta consiste en mover los puntos a lugares estáticamente correctos, de esta manera queda un resultado más uniforme. Además intenta eliminar los errores que han sido introducidos por el escaneo del modelo. En la siguiente imagen podremos apreciar algún pequeño cambio.



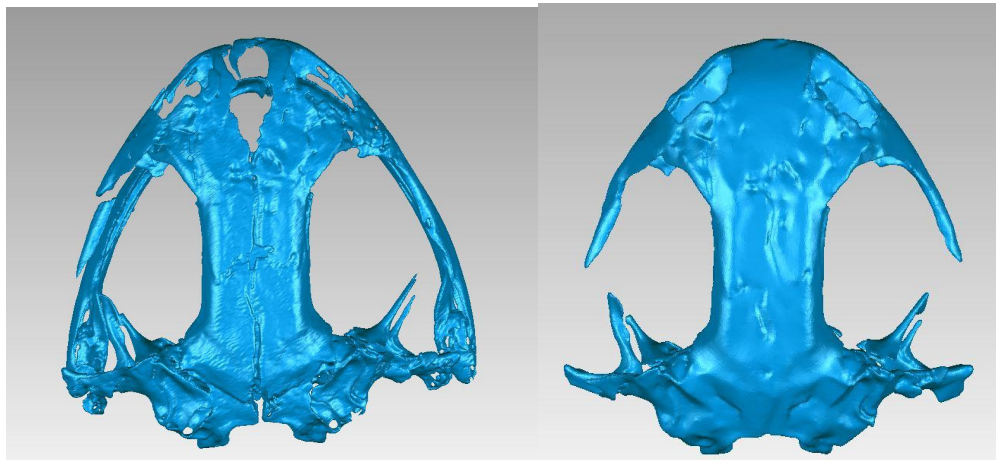
**Figura 5.8** Comparación modelo antes y después de reducción de sonido. Fuente: Propia

Se puede apreciar que hay un cambio pero muy minúsculo, eso es que no hay que realizar cambios muy bruscos para no perder información necesaria e importante de la pieza.

#### 5.2.1.2 Llenar agujeros

Esta herramienta es muy importante en nuestro caso, ya que el modelo proporcionado tiene muchos agujeros por algún golpe, y se va a recurrir mucho a esta herramienta para poder llenar todos los agujeros que en el modelo real no están, y así al realizar un estudio FEA no se pierdan informaciones importantes. Esta herramienta también sirve para eliminar o modificar irregularidades concretas del modelo que con el resto de herramientas no se puede corregir.

Esta herramienta aparte de tapar agujeros pequeños también se ha usado para tapar grietas muy grandes, o la separación entre huesos que antes no existía. En la siguiente imagen se ve el modelo antes y después de haber utilizado la herramienta de tapar agujeros.



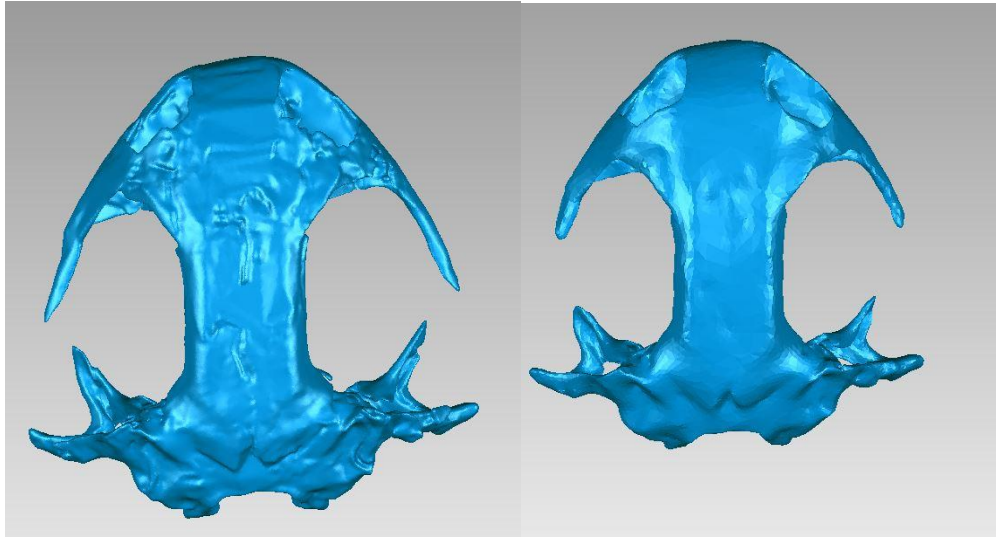
**Figura 5.9** Antes y después de utilizar el llenado de agujeros. Fuente: Propia

Como se puede observar en las dos imágenes se aprecia una mejora importante, antes en la zona de la mandíbula superior había una gran grieta que gracias a esta herramienta se ha podido corregir, a parte la separación de la mandíbula superior en la zona izquierda se ha podido corregir para unir las, así como los pequeños agujeros que hay sobre toda la superficie.



### 5.2.1.3 Reducción de triángulos

La reducción de triángulos es una herramienta que se usa para reducir el número de polígonos para poder trabajar más óptimamente sin comprometer los detalles de la superficie. En la siguiente figura se expondrá dos imágenes con número de triángulos diferentes, pero sin variar los detalles de la superficie.



**Figura 5.10** Variación en el número de triángulos. Fuente: Propia

Como se puede observar el número de triángulos esta reducido muy notablemente, en la parte de la derecha habían 700000 triángulos, mientras que en la izquierda son solo 75000, es decir una décima parte casi, y se ha mantenido la geometría del cráneo, es decir la geometría, la simetría, etc., aunque hayan pequeñas variaciones pero no se consideran importantes.

#### 5.2.1.4 Relajación del modelo

Esta herramienta sirve para mejorar la calidad de la superficie, es decir después de realizar una reducción de triángulos, estos no estarán dispuestos de la misma forma que estaban antes, y formarán ángulos entre ellos, de esta manera se permite obtener un modelo con una superficie más suave y fácil de tratar posteriormente.

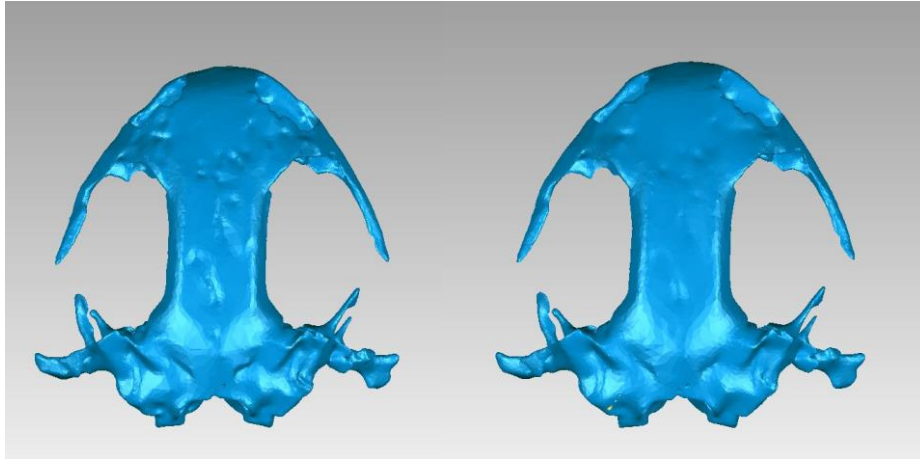


Figura 5.11 Antes y después de relajar. Fuente: Propia

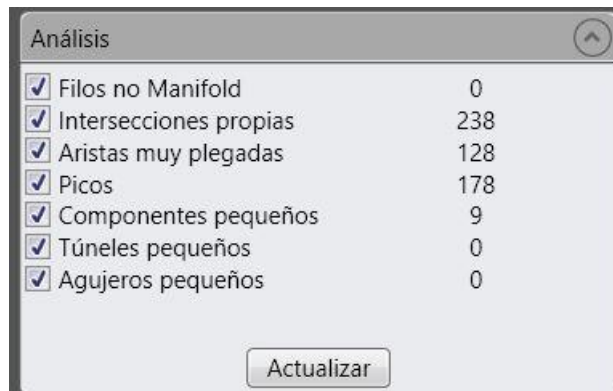
Como se puede observar en la figura, son dos imágenes una con reducción de triángulos, y acto seguido se aplica la relajación, lo que se obtiene son superficies mucho más suaves y fáciles de tratar, por lo que es una herramienta muy cómoda de usar y permite lograr grandes resultados.

#### 5.2.1.5 Mesh Doctor

El Mesh Doctor es una herramienta de mejora automática, que ya está integrada en el software de Geomagic Studio, esta herramienta mejora y repara toda la geometría tanto externa como interna que podrían dar problemas a la hora de tratar con otro software.

Mesh doctor tiene en cuenta los siguientes aspectos a la hora de corregir los errores:

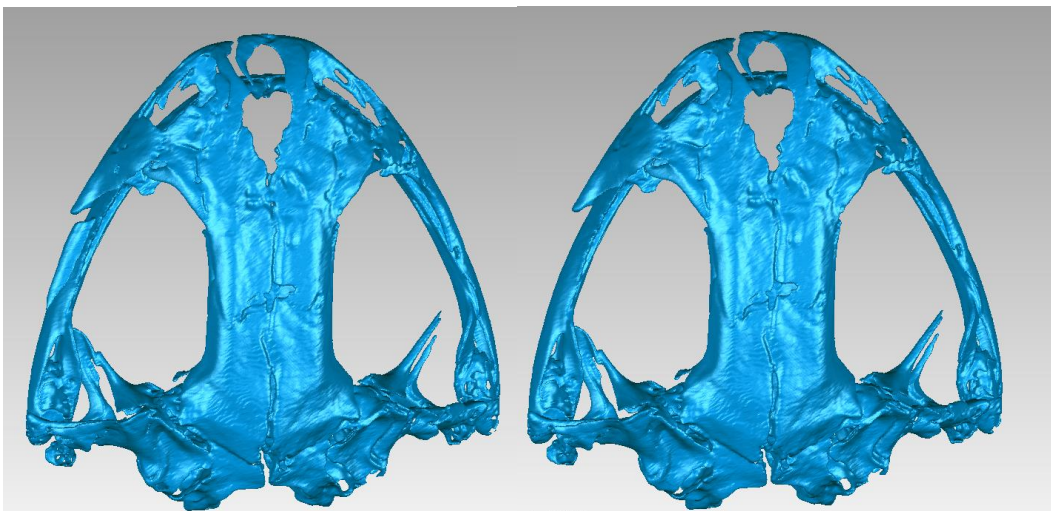




**Figura 5.12** Aspectos que tiene en cuenta Mesh Doctor. Fuente: Propia

A diferencia de las otras herramientas, Mesh Doctor trabaja cualquier tipo de problema que encuentre, y corrige todos los problemas a la vez independientemente de que problema sea. Esta herramienta siempre se utiliza al final de cada periodo de adaptación, porque el resto de herramientas adapta el modelo, pero siempre quedaran algunas irregularidades que no podrán ser corregidas manualmente, y se necesitará la ayuda de Mesh Doctor para corregirlo.

Aunque hay que tener también en cuenta que Mesh Doctor puede llegar a eliminar información muy importante de la pieza por lo que se deberá ir con cuidado a la hora de aplicar Mesh Doctor. En la siguiente foto se muestra el modelo original que hemos conseguido en Avizo, y acto siguiente se ha aplicado Mesh doctor, como podemos observar Mesh Doctor ha corregido muchos problemas de agujeros que habían en la pieza, pero también ha eliminado parte importante de la mandíbula superior que no estaba fijado en el cráneo.



**Figura 5.13** Antes y después de Mesh Doctor. Fuente: Propia

### 5.2.2 Características de la geometría a mantener

Antes de ponerse a realizar las adaptaciones comentadas en el apartado anterior es importante reconocer una serie de características que se deben mantener en la geometría durante estos procesos. Es por eso que se irán tratando con cuidado todos los procesos que se hacen para poder mantener estas características lo más parecido al modelo inicial. Una de las características más importantes es la simetría bilateral, que es la simetría que se puede dividir un cuerpo con un plano de simetría, así pues estas son las características que mantendremos en el cráneo reconstruido:

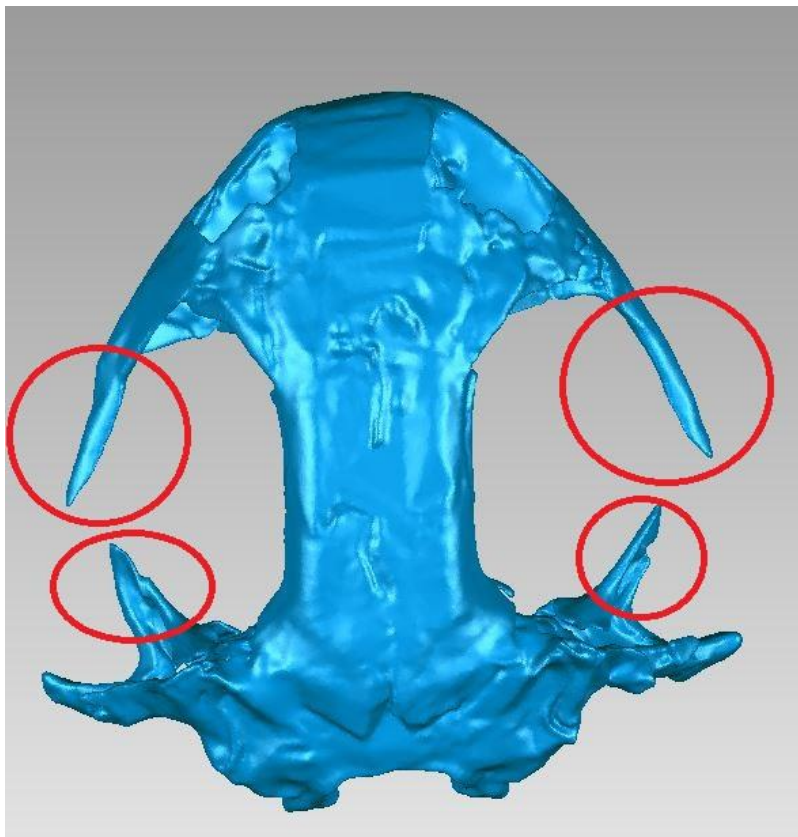


Figura 5.14 Características a mantener. Fuente: Propia

### 5.2.3 Adaptación de la geometría

A partir de esta parte, teniendo en cuenta las características a mantener que hemos mantenido anteriormente, se ha procedido a realizar la adaptación del modelo. Las adaptaciones se han realizado con las herramientas que se han mencionado antes en el apartado 5.2.1, en este apartado se ha realizado las adaptaciones de método cíclico hasta obtener el modelo final que se quiere. A continuación se mostraran cada uno de los apartados hasta llegar al modelo final.

Lo primero que hemos hecho ha sido tapar los agujeros, ya que la pieza ha sido un modelo que a lo mejor ha sufrido un golpe para poder repararla primero se ha tenido que tapar todos los agujeros. Después se ha procedido a eliminar los dientes del modelo ya que al estar hecho de un material diferente que el cráneo, y al realizar el método FEA los resultados obtenidos a lo mejor variarán mucho con los resultados reales, por eso se ha procedido a eliminar los dientes. Además al eliminar los dientes se pueden sustituir los dientes por las condiciones de contorno que se proponen en el FEA.

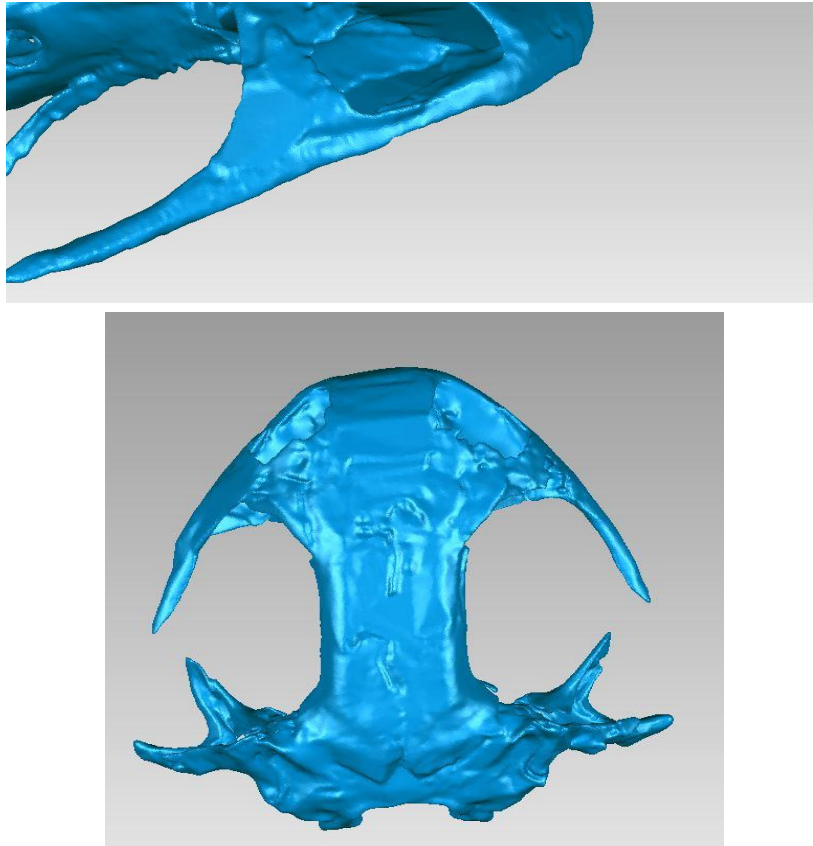


Figura 5.15 Primero arreglo. Fuente: Propia

Más tarde según recomendaciones de Josep se arreglaron huesos que estaban separados y que en teoría tendrían que ir juntos, además de la simetría muy parecida que debería tener un lado y el otro, para que se pueda aproximar más al cráneo real de una salamandra.

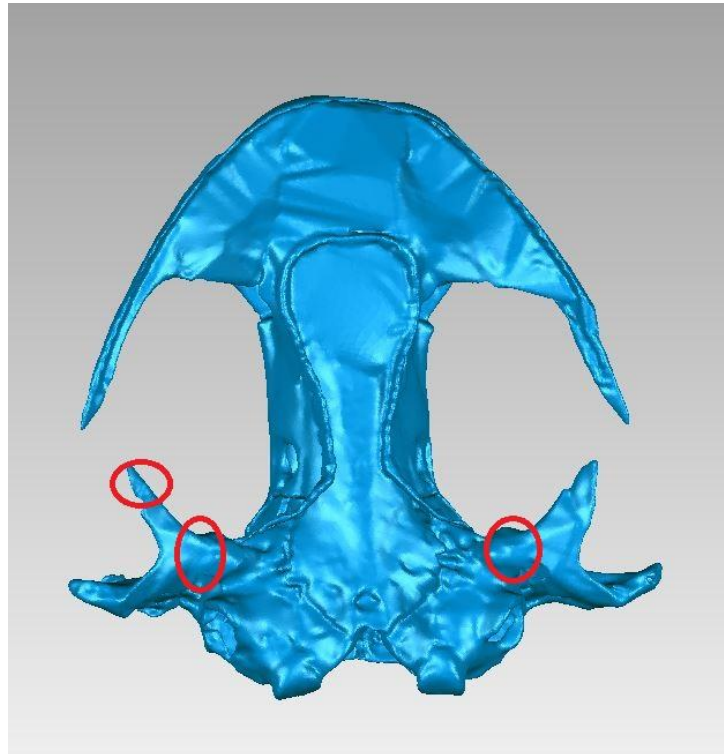
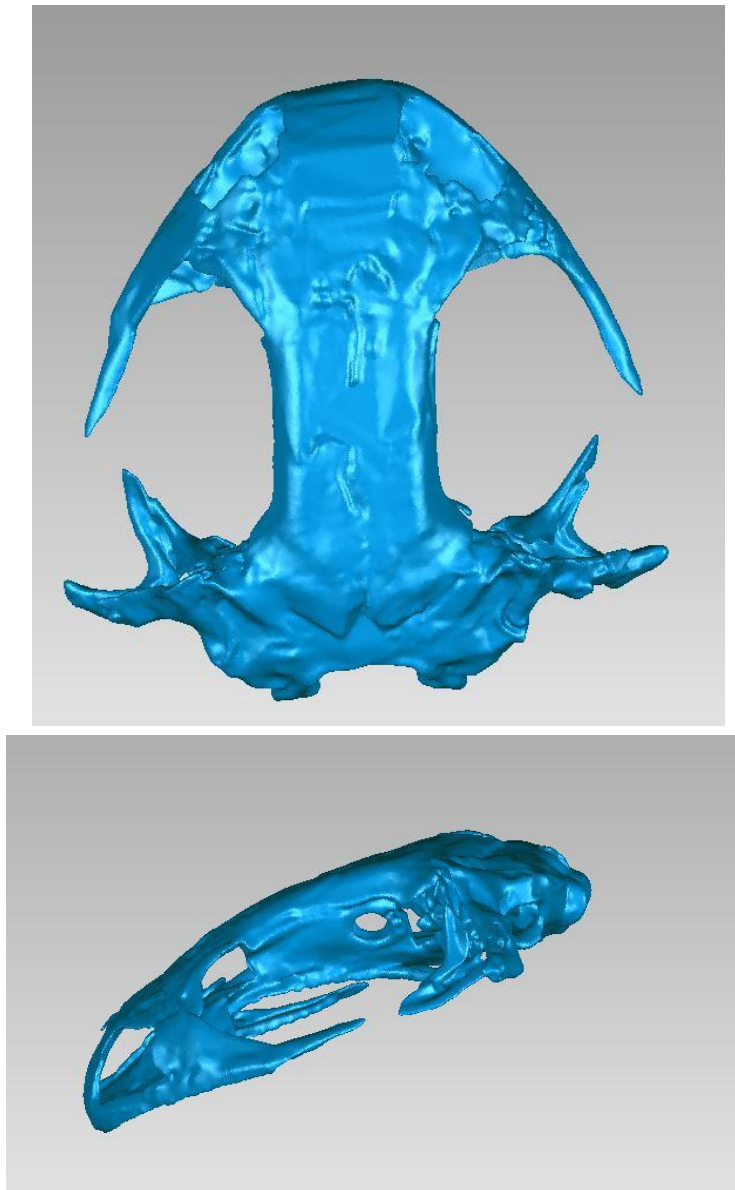


Figura 5.16 Zonas arregladas. Fuente. Propia

Después de corregir estos errores se han ido repitiendo las adaptaciones con las herramientas anteriormente comentadas, y que en los siguientes puntos se irán mostrando.

#### 5.2.3.1 Ciclo inicial

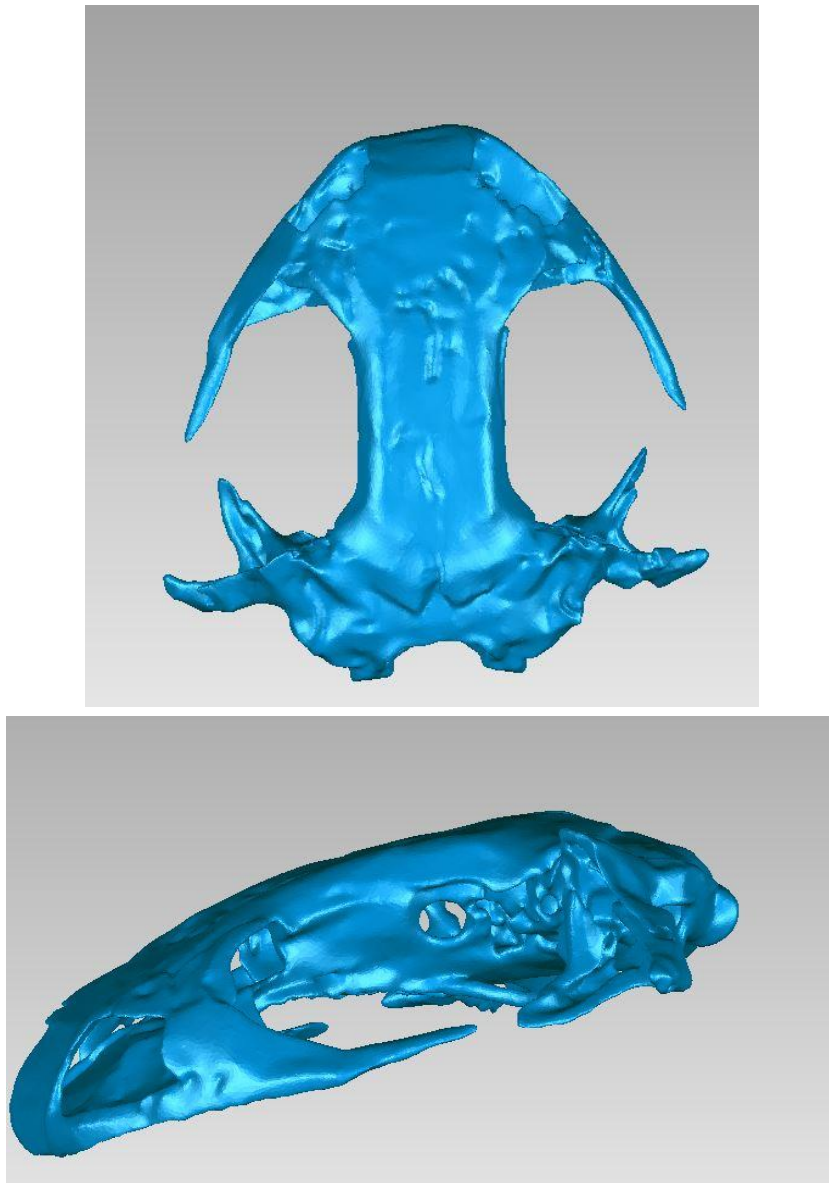
En la siguiente figura se puede observar el primer ciclo de adaptación, después de aplicar todas las herramientas, el modelo se ve bastante suavizado después de reducir a 700000 triángulos, con un tamaño de fichero de 82Mb.



**Figura 5.17** Primero ciclo después de aplicar todas las herramientas. Fuente: Propia

#### 5.2.3.2 Ciclo medio

En esta figura se puede ver que la superficie se ve mucho menos rugosa, y las cavidades poco a poco han ido desapareciendo, aunque aún quedan partes que se podrían mejorar más. Este modelo tiene unos 600000 triángulos, pesando unos 70 Mb.

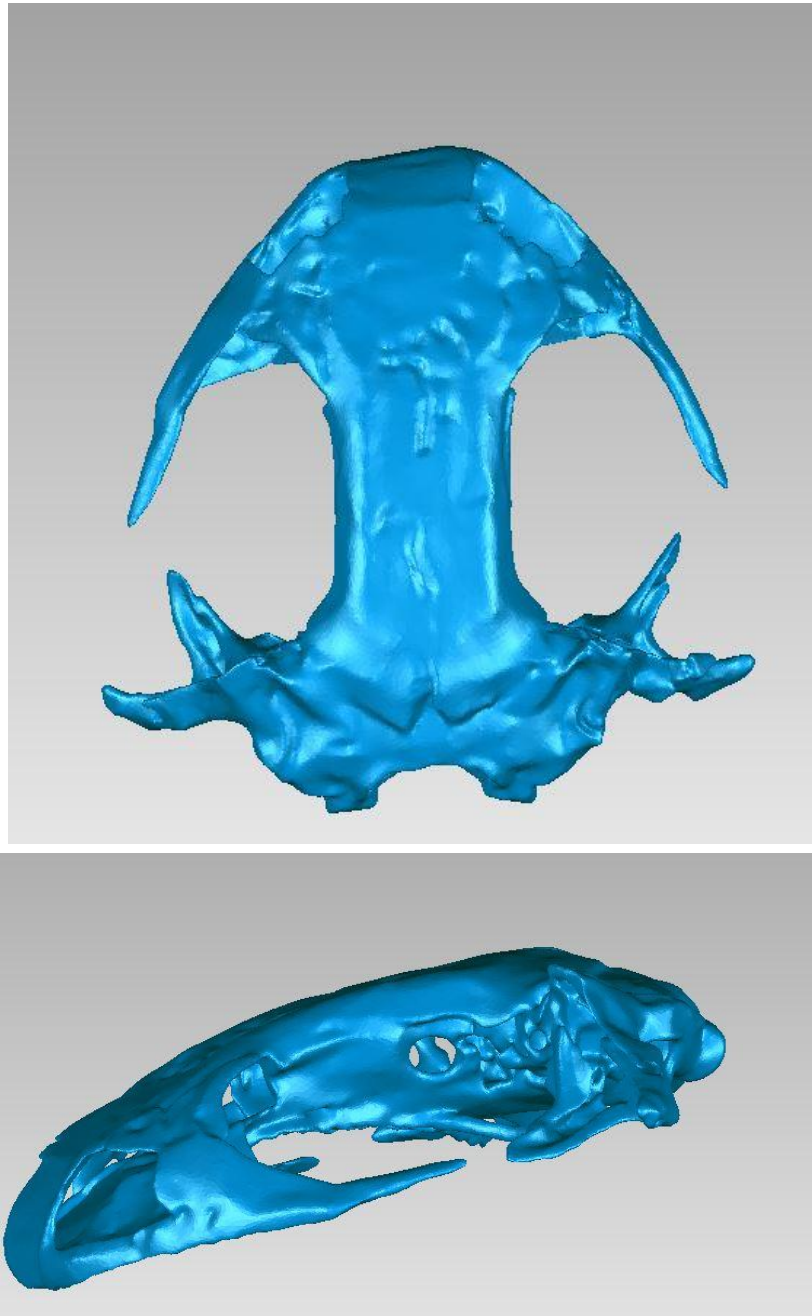


**Figura 5.18** Segundo ciclo de la adaptación. Fuente: Propia

#### 5.2.3.3 Ciclo pre-final

En ese ciclo de adaptación se puede apreciar que la superficie ha reducido su rugosidad, se puede apreciar también que muchas cavidades también han desaparecido, nos vamos acercando cada vez más a la superficie deseada. Aquí hemos reducido el modelo a 3750000 triángulos, con un peso de alrededor de 45 Mb.



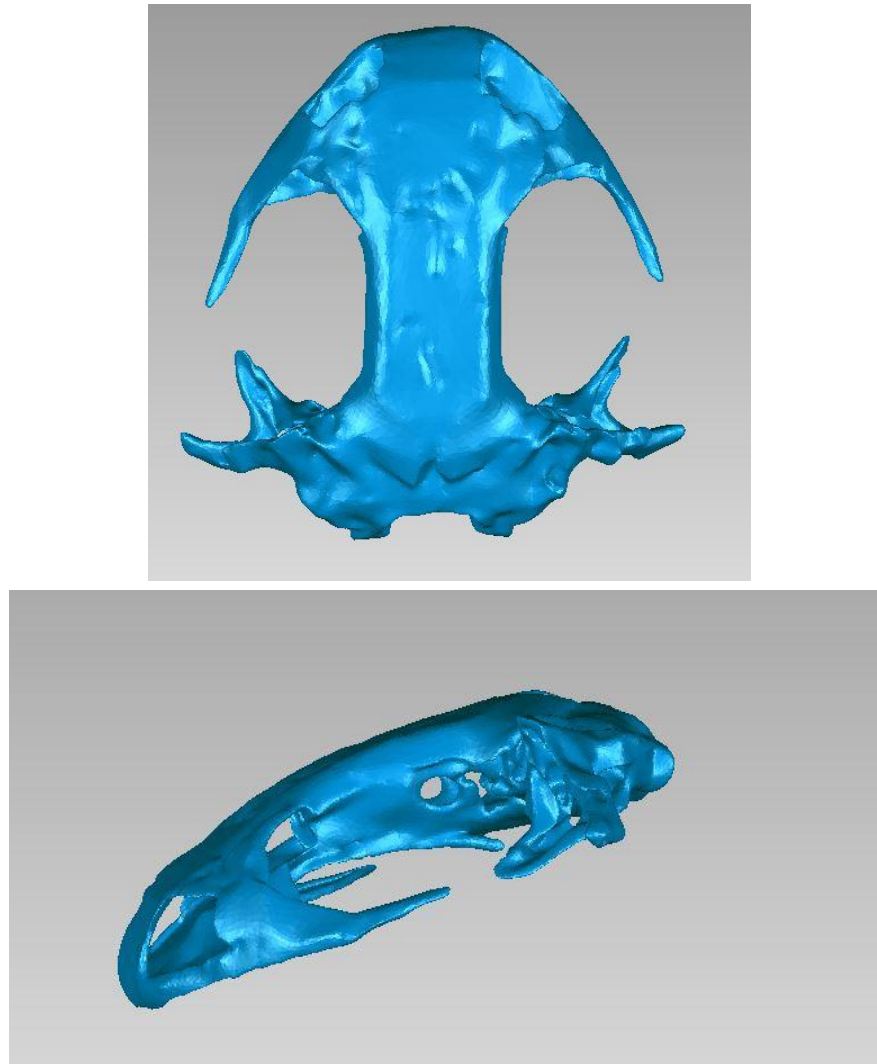


**Figura 5.19** Tercer ciclo de adaptación. Fuente: Propia

#### 5.2.3.4 Cuarto final

Este al ser uno de los últimos pasos que se han hecho, en la siguiente figura se puede observar que el cráneo ha quedado bastante suavizado, y muchas

de las partes han quedado bastante regulares. El modelo tiene 110000 triángulos y pesa alrededor de 40Mb.



**Figura 5.20** Cuarto ciclo adaptación. Fuente: Propia

#### **5.2.4 Modelo final**

El modelo final que se muestra en la siguiente figura es de una superficie uniforme y casi cero de rugosidad. Este modelo es idóneo para el análisis mediante FEA. Se considera que este modelo ya es definitivo, porque a lo mejor si se prosigue repitiendo un ciclo de adaptación, se podría perder mucha información importante. Este fichero tiene unos 75000 triángulos y tiene un tamaño de 37Mb.



En cuanto a las características que se ha dicho que hay que mantener en uno de los apartados anteriores, se puede observar que se ha mantenido casi toda la información. Aunque se ven algunas pérdidas no van a ser muy significativas a la hora de realizar el análisis. Se ve que la mandíbula superior se alarga, y los huesos que sobresalen de las cavidades aún siguen estando allí. Se ve que la simetría es casi perfecta, es decir se ha mantenido la simetría bilateral, aunque no haya sido una simetría perfecta, tampoco es muy relevante porque la simetría bilateral no es simétrica al cien por cien.

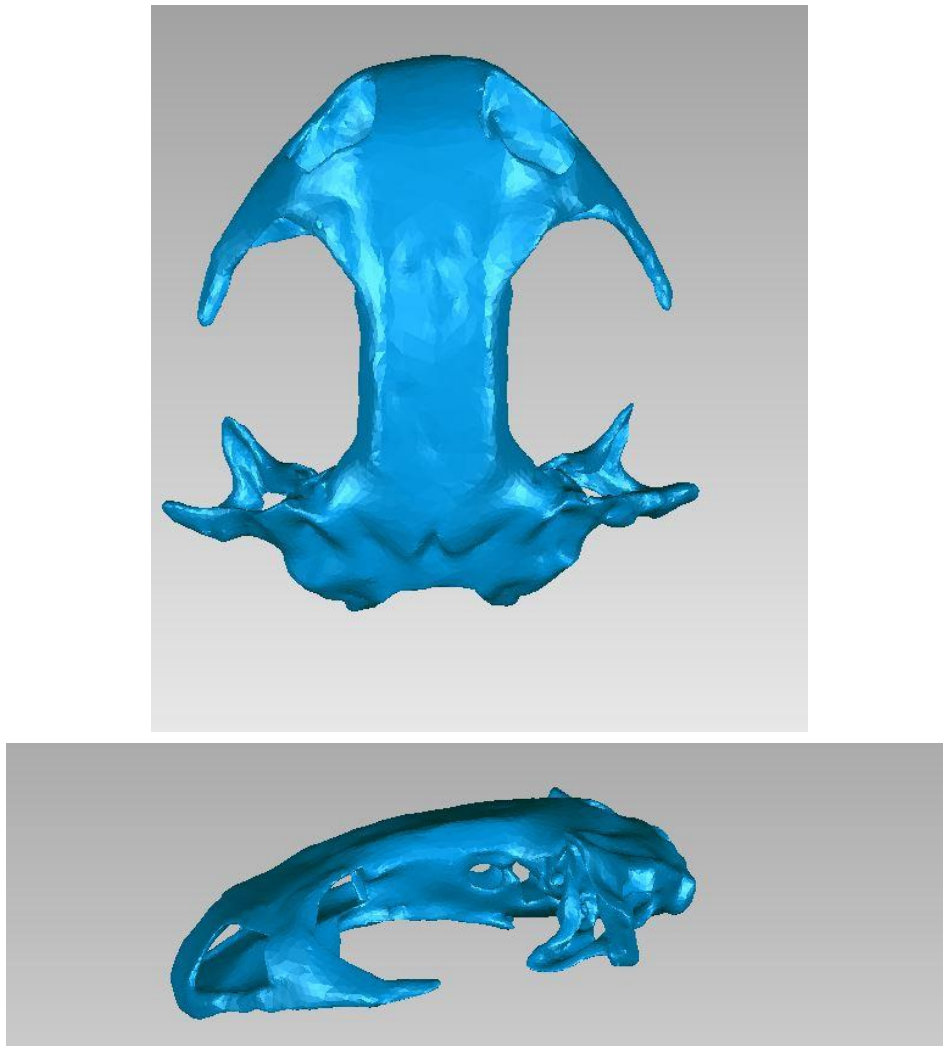
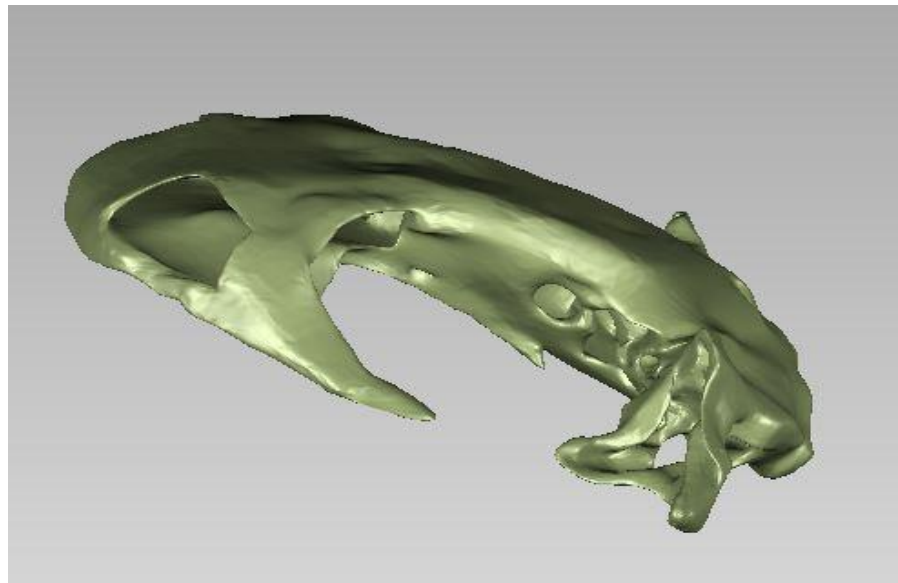


Figura 5.21 Adaptación final. Fuente: Propia

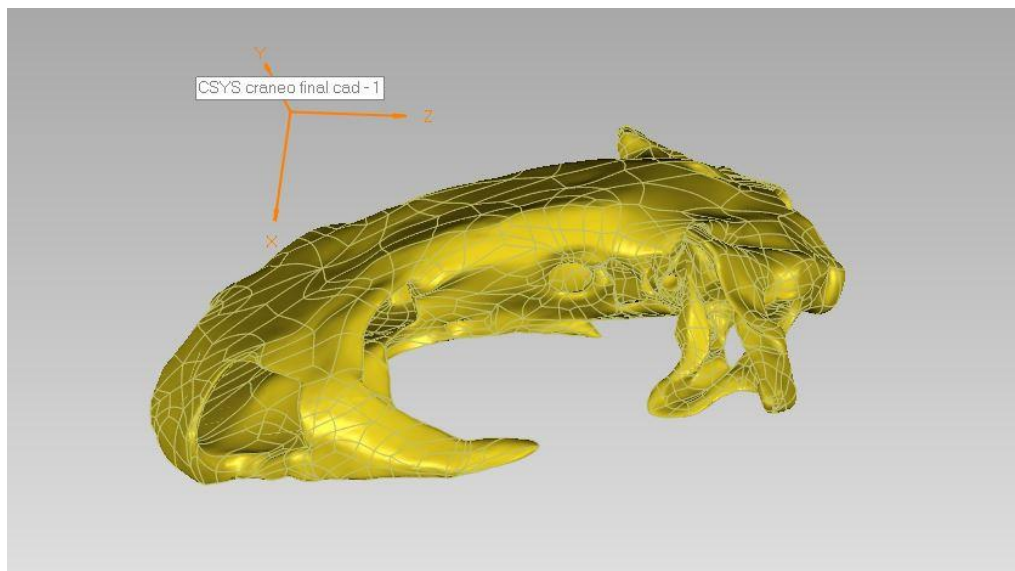
Una vez obtenido el modelo final, se tiene que convertir este archivo en CAD, para poder tratarlo posteriormente en el siguiente software. Y el primer paso

para pasar el modelo de polígonos formado por triángulos es transformarlo a NURBS, que es un modelo de superficie exactas, y después ya poder pasarlo a un archivo STP,SAT o IGS que son tipo CAD.

Las NURBS (Non-Uniform Rational B-Splines), son un modelo matemático que se usa para representar curvas y superficies de forma precisa, y es por eso que lo utilizamos para después transformarlo en CAD, en algún formato universal.



**Figura 5.22** Modelo en NURBS. Fuente: Propia



**Figura 5.23** Modelo CAD. Fuente: Propia

### 5.3 PROCEDIMIENTO PARA REALIZAR FEA

Una vez se tiene el modelo adaptado a formato CAD, este modelo se ha importado al software ANSYS® 15.0, que es un programa muy famoso para la realización de análisis FEA, que se usa ampliamente en campos de la ingeniería como en la mecánica estructural. El análisis que se hace es un análisis estructural estático en el cual se representan los mecanismos de alimentación de una salamandra. Para poder realizar este análisis se ha asignado las propiedades al material, así como también hemos los músculos con sus debidas fuerzas y sus puntos de fijación.

Así pues se dan dos tipos de condiciones de contorno que son bastante habituales en este tipo de estudios: la primera es un soporte único en el lugar de la primer cervical que se conecta con el cráneo impidiendo el movimiento en todas las direcciones, y el segundo caso es restringiendo el movimiento de la unión de la primera cervical con el cráneo y al mismo tiempo impidiendo la zona de articulación de la mandíbula (Josep Fortuny, Jordi Marcé Nogué et al., 2015), aunque en este análisis solo se analizara usando la segunda forma, como aparece en el artículo (Josep Fortuny, Jordi Marcé Nogué et al., 2015).

El software ANSYS® 15.0 dispone de la interfaz que se muestra en la siguiente figura, para definir todo aquello necesario a la hora de realizar un FEA en una estructura estática. Más adelante se explicaran cada uno de los apartados que aparecen, así como los resultados obtenidos.



Figura 5.24 Interfaz de Ansys® con lo necesario para hacer FEA. Fuente: Propia

### 5.3.1 Selección del material

El primero de los pasos es seleccionar las propiedades del material que se le asignarán al hueso de la salamandra. En un estudio así es normal no saber las propiedades concretas del material ya sea por problemas económicos, por la dificultad de la obtención de la muestra o por que la experimentación que se lleva a cabo no está permitida tomar estos datos. Por eso en este tipo de estudios se suponen propiedades conocidas de algún otro estudio similar.

Aunque, se ha de tener en cuenta que el hueso es una estructura biológica con estructuras complejas difíciles de simular con precisión. El hueso es un material anisótropo que está compuesto por dos tipos de tejidos: el hueso compacto y el hueso esponjoso. Cada uno de los materiales del hueso aporta diferentes propiedades y densidades a la totalidad del hueso.

El hueso compacto es la parte más externa del hueso, que tiene una porosidad de entre 5% y 30%, tiene una densidad más grande que el hueso esponjoso. De esta manera representa un alto porcentaje de la masa del mismo. En muchos casos, este es considerado como un material ortótropo, es decir un tipo de material anisótropo que su módulo de Young varía en tres direcciones diferentes.

El hueso esponjoso, tiene una porosidad muy elevada, así facilita el paso de la sangre por su interior. Es la que menos porcentaje de masa aporta a la totalidad del hueso debido a su baja densidad. A diferencia del hueso compacto, es difícil conocer sus propiedades ya que su densidad varía en función de la porosidad de esta.

Las diferencias entre estos tejidos del hueso son lo que causan la variación de las propiedades del hueso. El hueso compacto aportaría más resistencia a la compresión, mientras que la esponjosa aportaría más resistencia a la flexión. Por eso se considera un material anisótropo, ya que las propiedades varían en función de la dirección, y por tanto la respuesta a la fuerza también. De esta manera sería capaz de soportar grandes cargas en el plano longitudinal y poco en el plano transversal.

Debido a la gran diferencia que hay entre los dos materiales que componen los huesos, habitualmente la mayoría de los modelos se realizan haciendo que las

propiedades del material sean isotrópicas. A parte de su isotropía también se supone la linealidad del comportamiento constitutivo del mismo (Doblaré, García, & Gómez, 2004).

Así al no existir una caracterización de los huesos de la salamandra común, se ha optado por escoger los valores de  $E$  (Modulo de Young)  $=6,65 \text{ GPa}$  y de  $\nu$  (coeficiente de poisson) $=0.35$  (Fortuny, Marcé, et al., 2015).

Para aplicar este nuevo material, en la interfaz Ansys se ha introducido un material nuevo con estos datos.

### 5.3.2 Áreas de inserción muscular

Una vez seleccionado el material del modelo que se ha de analizar, se tiene que analizar los músculos que se tienen en cuenta en el análisis y las zonas de fijación del modelo. Como este estudio es sobre la salamandra común, y según el consejo de Jordi Marcé y Josep Fortuny, usaremos las condiciones de contorno de un estudio que se ha realizado sobre la salamandra gigante china (Fortuny, Marcé, et al., 2015), donde se muestran los músculos de este animal, con el que está estrechamente emparentado.

Así pues toda la musculatura queda definida por la salamandra gigante china, y por tanto solo hemos tenido en cuenta esos músculos.

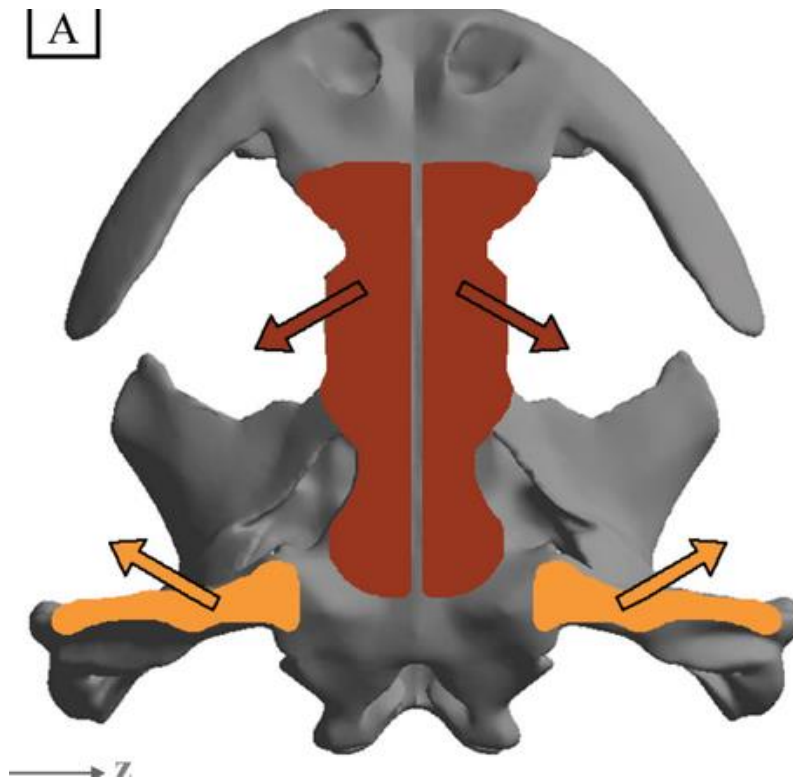


Figura 5.25 Musculatura salamandra gigante china

De esta figura se puede sacar que los músculos Adductor Mandibulae Externus (AME) y Adductor Mandibulae Internus (AMI), son los más importantes y que influyen en los mecanismos de alimentación.

Para poder modelar en un estudio estático es necesario un vector de fuerza o una presión y definir las áreas de inserción de los músculos en el cráneo. Aunque también se sabe que en estos estudios (Fortuny, Marcé, et al., 2015), siempre los músculos son aproximados a la realidad, estos músculos también serán una aproximación a la realidad.

La áreas musculares se han hecho mediante la herramienta de diseño CAD Desing Modeler, que viene dentro del paquete ANSYS® 15.0. Para realizarlo se ha hecho un croquis sobre el músculo, y se ha proyectado sobre la superficie del sólido para que posteriormente puedan ser seleccionados.

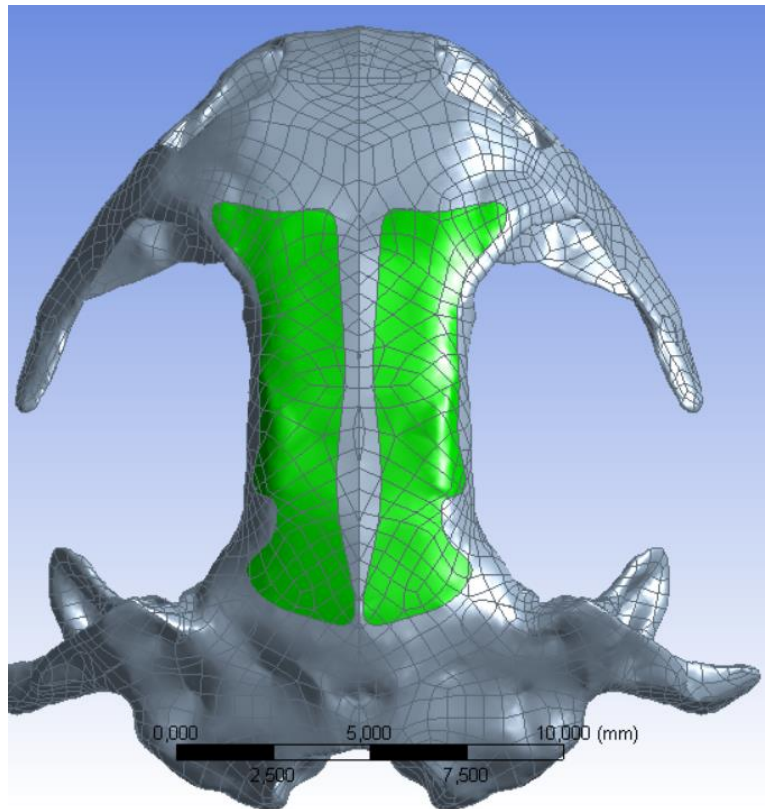


Figura 5.26 Inserción del musculo AME

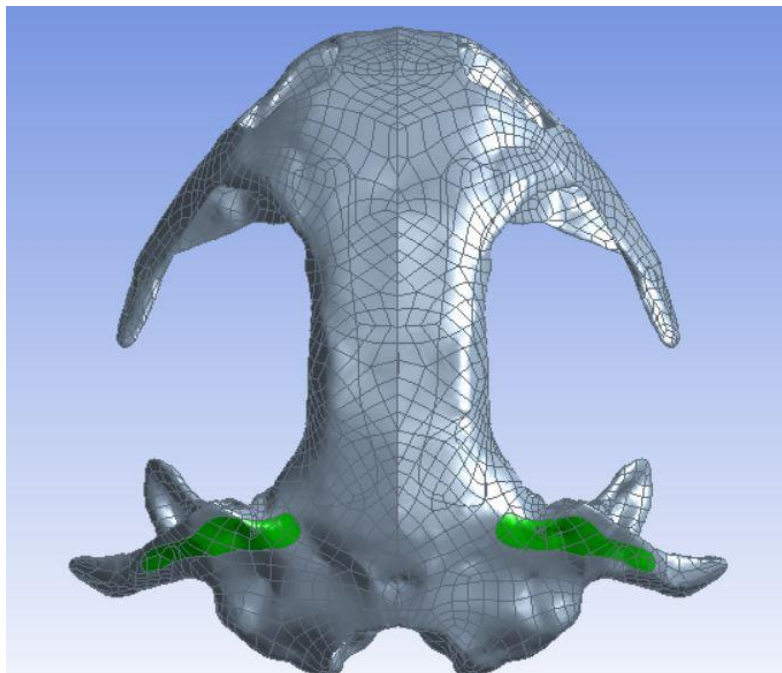
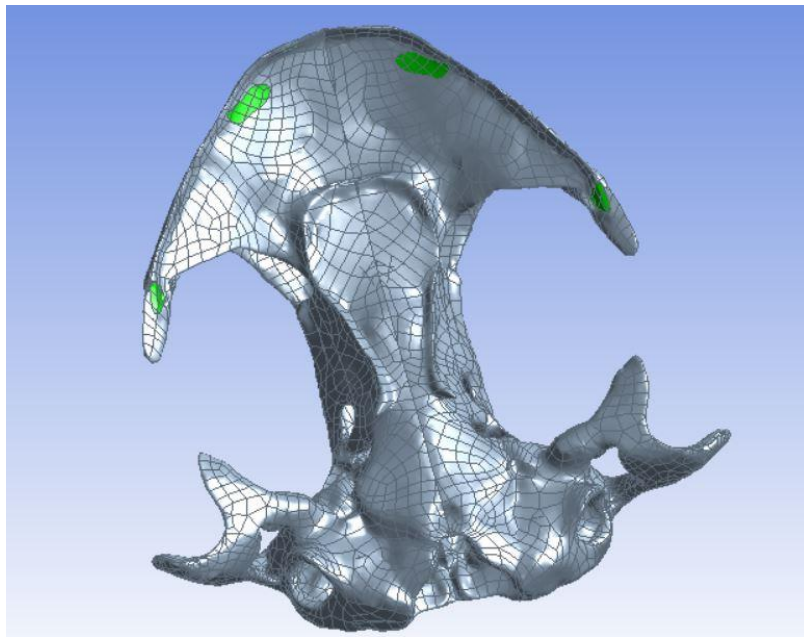


Figura 5.27 Inserción AMI



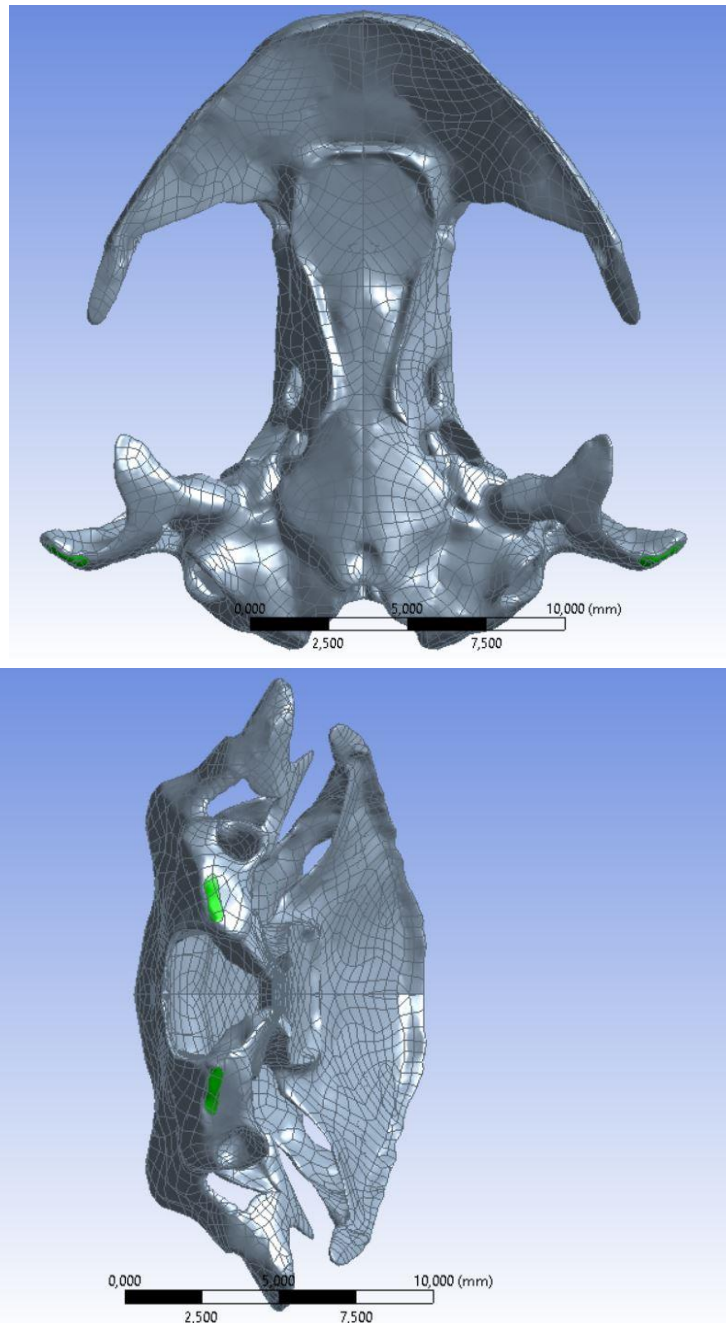
Como se puede ver en las figuras 5.26 la inserción solo se ha hecho en la parte izquierda del craneo y luego en la figura 5.27 se ha hecho una simetría, para poder evitar posibles errores.

A parte de las zonas de inserción muscular, también se han insertado las áreas de fijación, tanto de la mordida, como las de restricción del movimiento del cráneo. En las siguientes figuras en verde podremos ver las áreas de inserción para fijar la mordida y las de fijación de restricción de movimiento.



**Figura 5.28** Fijación de los dientes





**Figura 5.29** Fijación de restricción de movimiento

Como se puede observar, hay cuatro zonas de fijación: la zona donde se une la primera cervical con el cráneo, la zona anterior de la mordida, la zona posterior de la mordida, y la articulación de la mandíbula.

### 5.3.3 Mallado de la geometría

Una vez se han fijado las áreas de fijación y de inserción muscular, el siguiente paso es proceder al mallado en elementos finitos. El software ANSYS® 15.0 ofrece una gran ventaja en la división del modelo en elementos finitos. Al tratarse de una geometría muy compleja no todos los métodos son adecuados para el mallado de la geometría. De esta manera el método empleado es el Patch Independent con elementos tetraédricos.

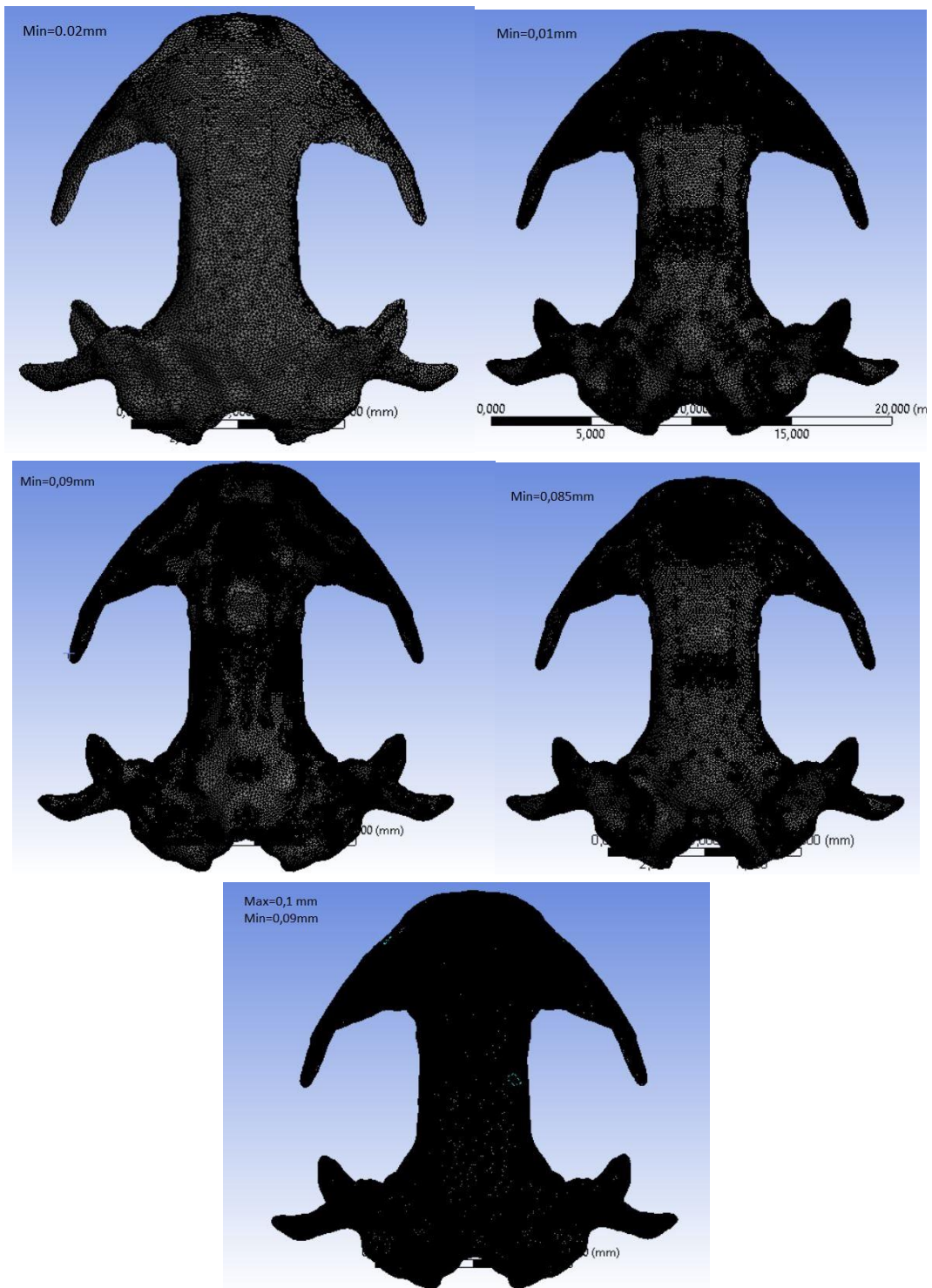
Este método se caracteriza por ser una técnica de mallado que ni las caras ni sus contornos tiene que ser respetados si estas no tienen una carga o unas condiciones de contornos. Así entonces generará un volumen que envuelva toda la geometría y después la proyecta a caras y ejes.

Se han escogido los tetraedros porque son los que mejor se adaptan a las geometrías complejas, como es en nuestro caso. Además el método Patch Independent con la elección de tetraedros es frecuentes en este tipo de estudios (Fortuny, Marcé, et al., 2015).

El mallado se ha realizado con una medida grande con respecto a la muestra para poder ver los posibles errores aunque sea con un coste más reducido. Aunque se ha ido reduciendo el tamaño de la malla hasta obtener un mallado satisfactorio.

Hay diferentes indicadores de calidad para poder evaluar la malla, como son el Orthogonal quality, que indica el grado de perpendicularidad entre caras y celdas, y el Skewness, que indica la desviación entre una celda y una celda ideal con elementos tetraédricos. En Orthogonal Quality un valor de 1 es muy bueno mientras que un 0 es muy malo, y en Skewness es al revés.

Se procede entonces a realizar el mallado de nuestro modelo, con el que hemos propuesto diferentes tipos de mallado cambiando la medida mínima del elemento. Al ser una pieza muy pequeña, ya que las distancias máximas entre un punto y otro solo hay una diferencia de 20mm, también para realizar el mallado hemos cogido distancias muy pequeñas que variarán de 0.2mm a 0.085mm.



**Figura 5.30** Mallados con medidas diferentes. Fuente: Propia

Medida mínima del elemento [mm]	Medida máxima del elemento [mm]	Elementos	Nodos	Orthogonal quality [media]	Swekness
0,2	Default	286049	460654	0,8392	0,2482
0,1	Default	1578935	2359389	0,8552	0,2319
0,09	Default	1891882	2808550	0,8528	0,2382
0,085	Default	2059846	3049049	0,8514	0,2421
0,09	0,1	3153416	4610524	0,897	0,1524

**Tabla 5.1** Características de los mallados. Fuente: Propia

Como se puede observar en la imagen 5.30 y en la tabla 5.1 se puede ver las diferentes características de cada malla, como se puede observar a medida que vamos disminuyendo la medida aumentan el número de nodos y elementos, y los indicadores cada vez se vuelven mejores. También se puede ver que si insertamos un máximo en la medida y no lo dejamos al azar, el número de elementos y nodos es mucho mayor, y en la imagen se puede observar que el mallado recubre más zona y se ve más densidad. También se puede observar que los indicadores son los mejores comparados con los otros 4 mallados. Por esa razón se coge el último mallado para realizar el análisis.

#### 5.3.4 Definición de las condiciones de contorno

Para poder las condiciones de contorno hay que definir las áreas de musculatura y de fijación, acto después hay que fijar la zona donde el cráneo está en contacto con las vértebras, y la zona de la articulación de la mandíbula. Después se aplican las cargas en las áreas de musculatura. Porque se quiere simular dos tipos de mordida: la mordida bilateral y la mordida unilateral. En bilateral los dos lados de la mandíbula están mordiendo, mientras que en la unilateral solo estará mordiendo la izquierda, por lo que el derecho fue el lado de balanceo. Para cada caso se hizo con aprehensión posterior y anterior.

Para poder obtener las fuerzas de la salamandra común, al no tener información previa, ni estudio previo de una salamandra común, se escogen los valores y las direcciones de los documentos (Fortuny, Marcé, et al., 2015) que data sobre estudios de la salamandra gigante china.

Además se puede ver en el documento que analizan dos especies de salamandra gigante china, un modelo adulto y un modelo joven, en el que se

aplican dos fuerzas diferentes mediante una transformación homotética. Así las fuerzas que obtienen se han sido escaladas en función del volumen de los modelos, ya que un modelo más pequeño tiene una fuerza más pequeña.

El escalado se puede aplicar de dos formas diferentes (Dumont, Grosse, & Slater, 2009): primero sería escalando la modelo a la misma medida que el tamaño original y aplicando directamente las fuerzas, lo segundo sería escalar las fuerzas para poder aplicarlas sobre el modelo original que se analiza. La segunda forma es la que utilizaremos en nuestro modelo.

#### 5.3.4.1 Deducción de la transformación homotética

Para llevar a cabo la transformación se ha basado en un estudio de Jordi Marcé, y Josep Fortuny (Fortuny, Marcé, et al., 2015), en el que también se ha llevado a cabo una adaptación homotética de las fuerzas. Siguiendo las siguientes deducciones (Fortuny, Marcé, et al., 2015).

La matriz homotética es una matriz diagonal que describe una transformación lineal  $J_{11} = J_{22} = J_{33}$ , manteniendo la misma proporcionalidad en las tres direcciones del espacio, donde  $\alpha$  es la escala lineal constante de una homotecia.

$$J_{ij} = \frac{dX_i}{dX_j} = \begin{pmatrix} \alpha & & \\ & \alpha & \\ & & \alpha \end{pmatrix}$$

**Ecuación 5.1** Matriz Jacobiana de transformación homotética

Si el volumen del modelo A es  $V_A = abc$ , de la matriz Jacobiana se obtiene que  $V_B$  es entonces,  $V_B = \alpha abc$ , de aquí se puede sacar  $\alpha$ , la constante de escala lineal.

$$\alpha = \sqrt[3]{\frac{V_B}{V_A}}$$

**Ecuación 5.2** Valor de  $\alpha$

Para que una homotecia se mantenga entre dos modelos A y B diferentes se necesitan cumplir con la siguiente ecuación:

$$\sigma_A(X_1, X_2, X_3) = \sigma_B(x_1, x_2, x_3)$$

**Ecuación 5.3** Relación que hay que cumplir para mantener la homotecia

Después se obtienen la relación de fuerzas entre los modelos A y B:

$$F_A = \iint_{A_A} \sigma_A(X_i) dA = \iint_{A_A} \sigma_A(X_i) dLdT = \iint_{A_B} \sigma_B(x_j) \frac{1}{\alpha^2} dldt = \frac{1}{\alpha^2} \iint_{A_B} \sigma_B(x_j) dldt \\ = \frac{F_B}{\alpha^2}$$

**Ecuación 5.4** Relación entre los dos modelos en función de  $\alpha$

Donde finalmente se obtiene la ecuación de la relación entre las fuerzas  $F_A$  y  $F_B$ :

$$F_A = \left( \sqrt[3]{\frac{V_A}{V_B}} \right)^2 F_B$$

**Ecuación 5.5** Relación final de fuerzas.

#### 5.3.4.2 Escalado de fuerzas

El escalado de fuerzas se ha realizado mediante la ecuación del apartado anterior. Los valores de las fuerzas se han obtenido de las fuerzas de la salamandra gigante china (Fortuny, Marcé, et al., 2015). En la siguiente tabla se muestran las fuerzas escaladas:

Músculos	Salamandra gigante china <b>Volumen=144340 mm<sup>3</sup></b>	Salamandra común <b>Volumen=163 mm<sup>3</sup></b>
	Fuerza [N]	Fuerza escalada[N]
AME	167,77	1,82
AMI	670	7,27

**Tabla 5.2** Tabla de fuerzas de las salamandras

Una vez se tiene el módulo de las fuerzas escaladas, se prosigue a calcular las tensiones. Según recomendaciones de Jordi Marcé, y siguiendo su artículo (Fortuny, Marcé, et al., 2015) el módulo de las tensiones tiene que ser de 0,3 MPa como el de la salamandra gigante china. Y después se proseguirá a descomponerlo en diferentes componentes para poder insertarlo en ANSYS® 15.0.

	<b>F [N]</b>	<b>Area [mm2]</b>	<b><math>\sigma</math> [MPa]</b>	<b><math>\sigma_x</math> [MPa]</b>	<b><math>\sigma_y</math> [MPa]</b>	<b><math>\sigma_z</math> [MPa]</b>
<b>AMI izquierdo</b>	7,27	23,808	0,30	0,192	-0,163	-0,163
<b>AMI derecho</b>	7,27	23,808	0,30	0,192	-0,163	0,163
<b>AME izquierdo</b>	1,82	6,2519	0,30	0,20	0,165	-0,15
<b>AME derecho</b>	1,82	6,2519	0,30	0,20	0,165	0,15

**Tabla 5.3** Área de los músculos y tensiones

Como se puede observar con las áreas insertadas, se han obtenido presiones de 0,3 que son las que se van a introducir en las áreas del músculo.

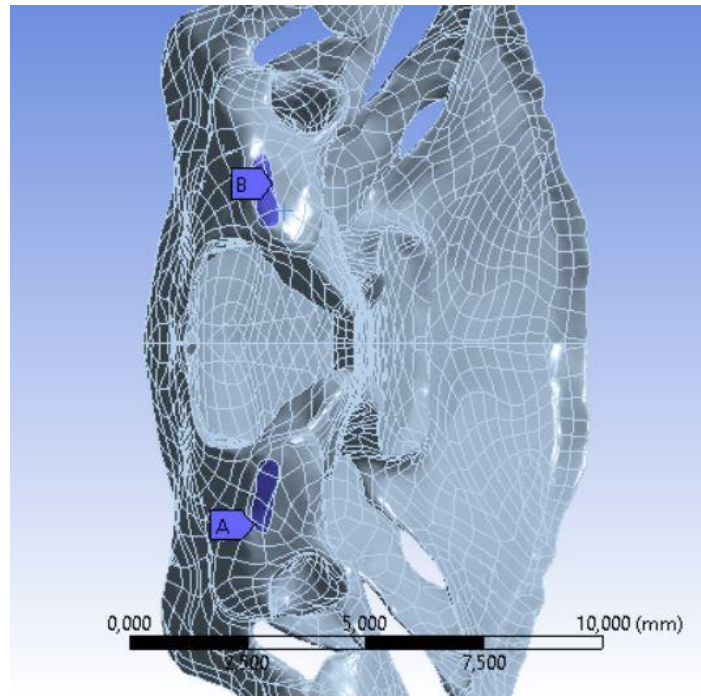
Acto seguido se procede a separar la tensión en las 3 componentes XYZ según el artículo mencionado anteriormente (Fortuny, Marcé, et al., 2015).

#### 5.3.4.3 Tipos de restricciones

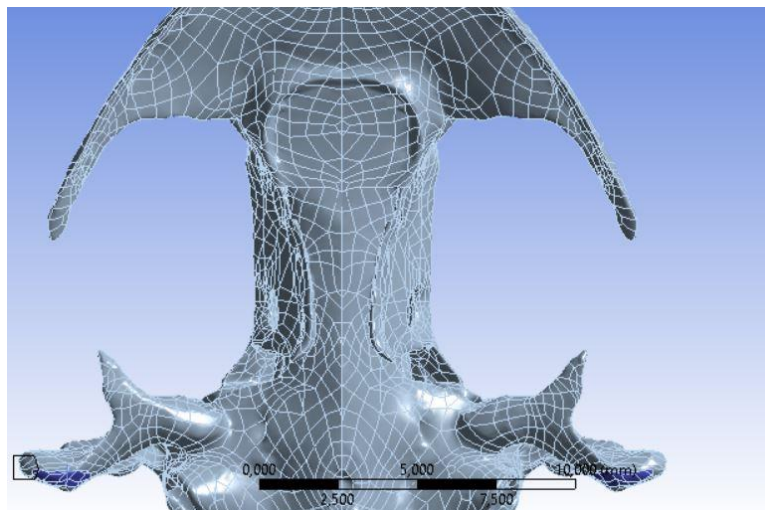
Como ya se ha comentado anteriormente, tendremos dos tipos de fijación, la primera es fijando solo la zona cervical, es decir al del cóndilo, y la segunda es fijando el cóndilo junto con la intersección entre las mandíbulas.

En nuestro caso se restringirá primero la zona del cóndilo a la vez que se fija la zona de la articulación de la mandíbula y se aplicara una mordedura bilateral anterior y después con la misma fijación, se aplicara una mordedura posterior. Después con la misma restricción se realizara la mordida unilateral posterior y anterior.





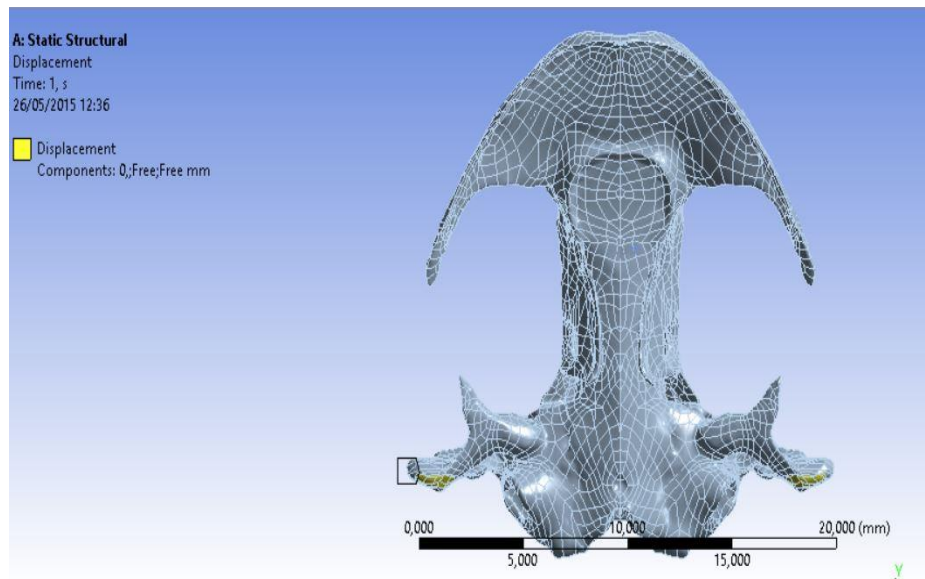
**Figura 5.31** Fijación cóndilo. Fuente: Propia



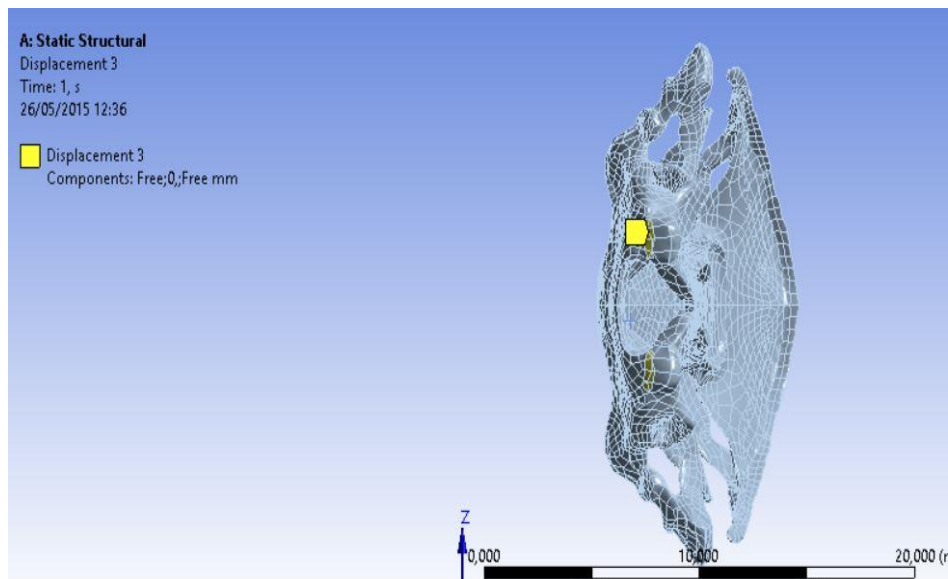
**Figura 5.32** Fijación articulación mandíbula. Fuente: Propia

Aunque para realizar un estudio más real, se utiliza los consejos del artículo (Josep Fortuny, Jordi Marcé Nogué et al., 2015), y en la zona del cóndilo solo se bloqueará el eje Y, mientras que en la zona de la articulación de la mandíbula se bloqueará la zona X.





**Figura 5.33** Fijación más real articulación mandíbula. Fuente: Propia



**Figura 5.34** Fijación más real cóndilo. Fuente: Propia

#### 5.4.3.4 Cargas en la mordida bilateral

La mordida bilateral es un tipo de mordida que se aplica fuerza con las dos partes de la dentadura, así se ejerce una fuerza en los dos lados, al mismo tiempo que en los dos lados hay contacto. Se realiza tanto la mordida anterior como la posterior.

En la siguiente figura se ven las condiciones que se han realizado en Ansys® 15.0.

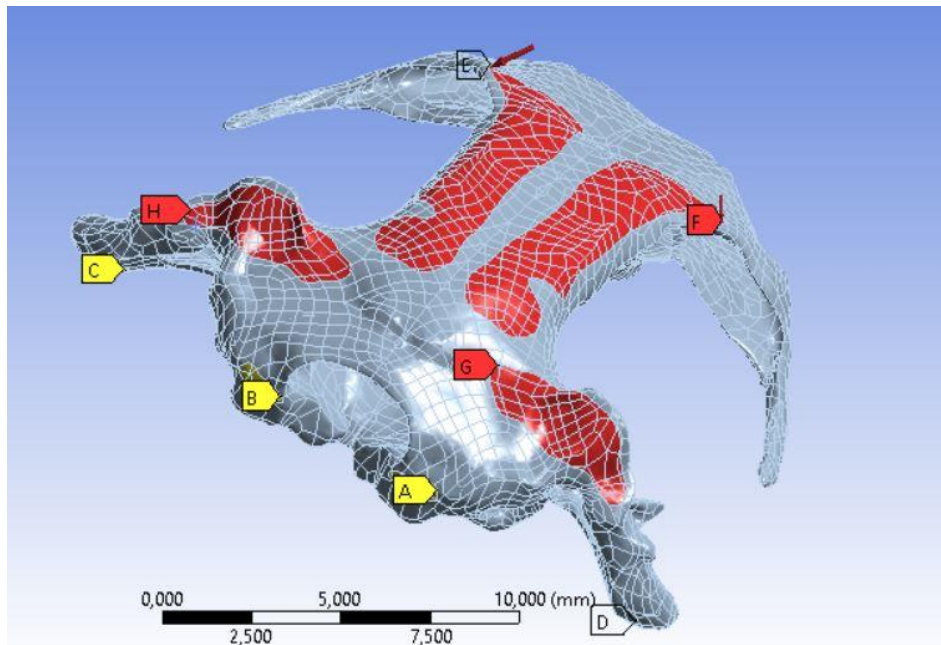


Figura 5.35 Fuerzas y fijación bilateral de arriba. Fuente: Propia

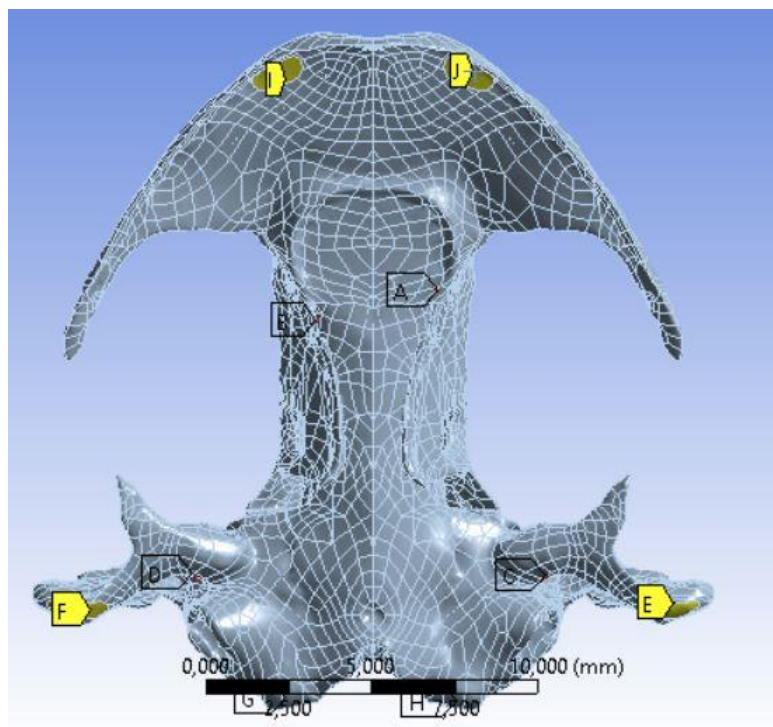
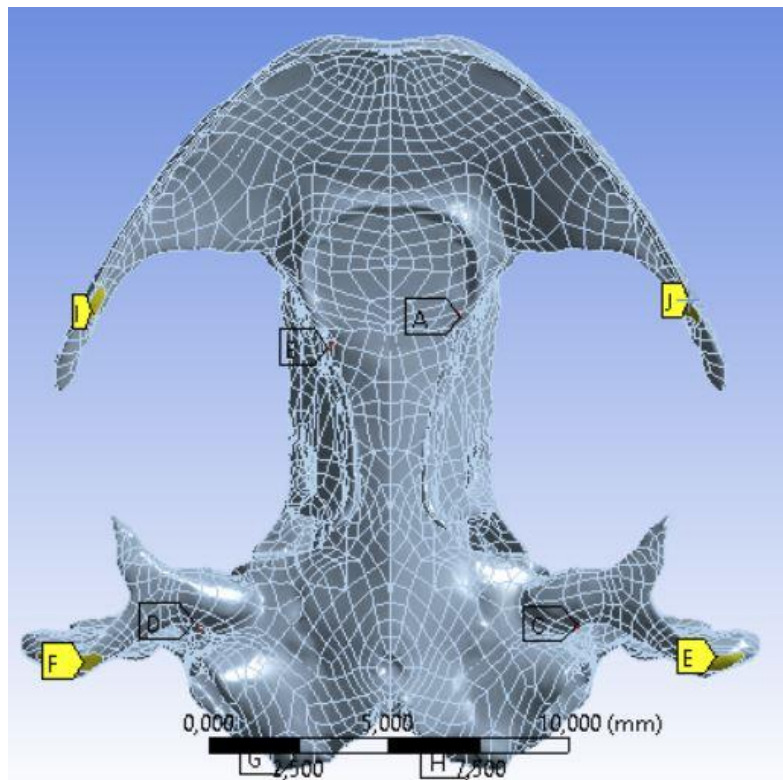
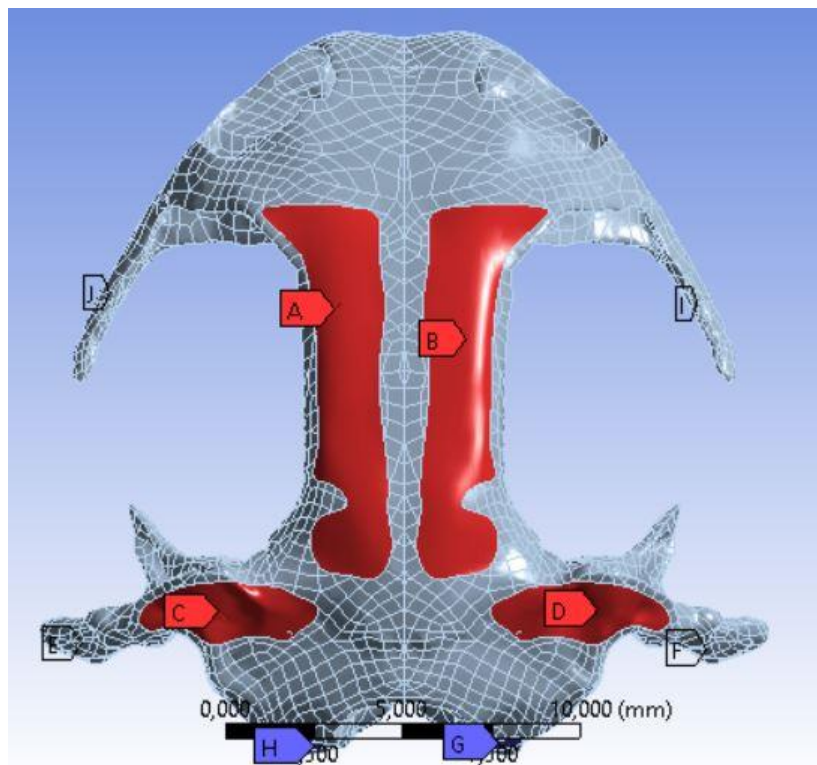


Figura 5.36 Fuerza y fijación bilateral de abajo. Fuente: Propia



**Figura 5.37** Fuerza y fijación mordida bilateral posterior de abajo. Fuente: Propia

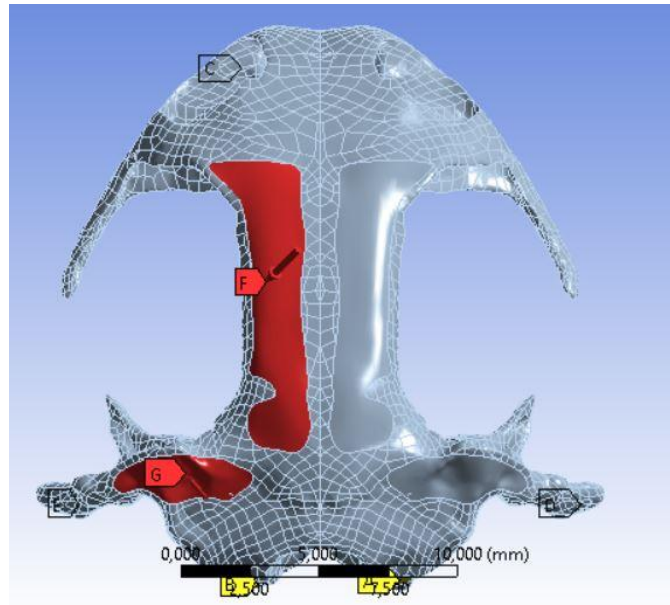


**Figura 5.38** Fuerzas y fijación de mordida bilateral posterior de arriba. Fuente: Propia

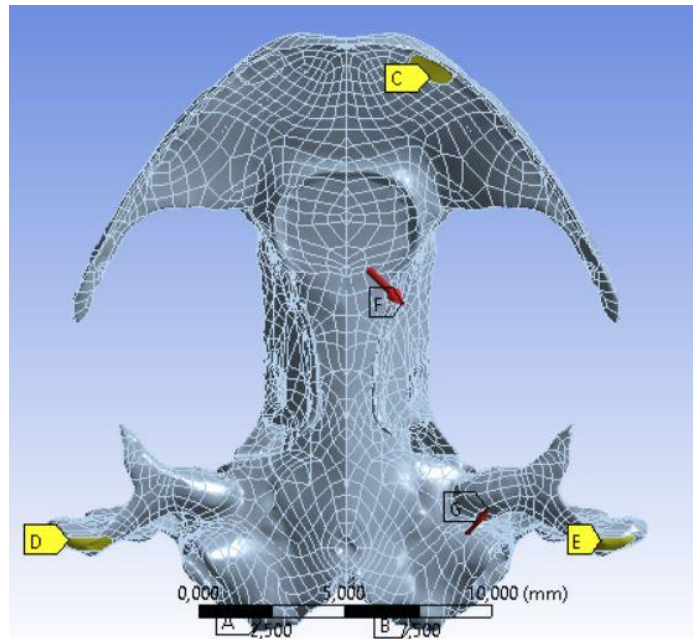
#### 5.4.3.5 Carga en la mordida unilateral

En este caso solo intervendría una fuerza, y solo habría una fijación en el lado izquierdo, también se hace con mordida posterior y mordida anterior.

Estas son las condiciones realizadas con Ansys®15.0.

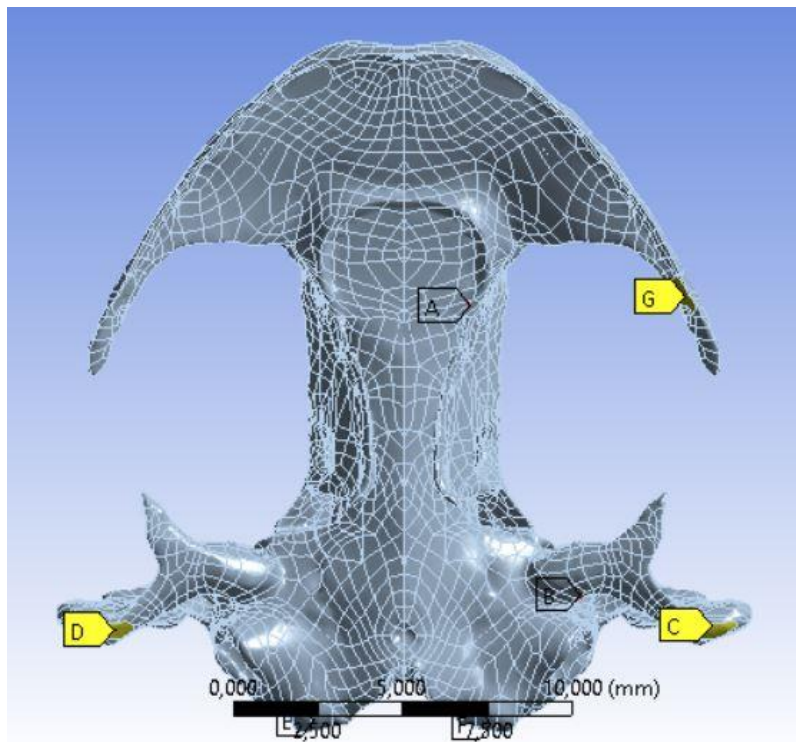


**Figura 5.39** Fuerzas y fijación de mordida unilateral anterior desde arriba. Fuente: Propia

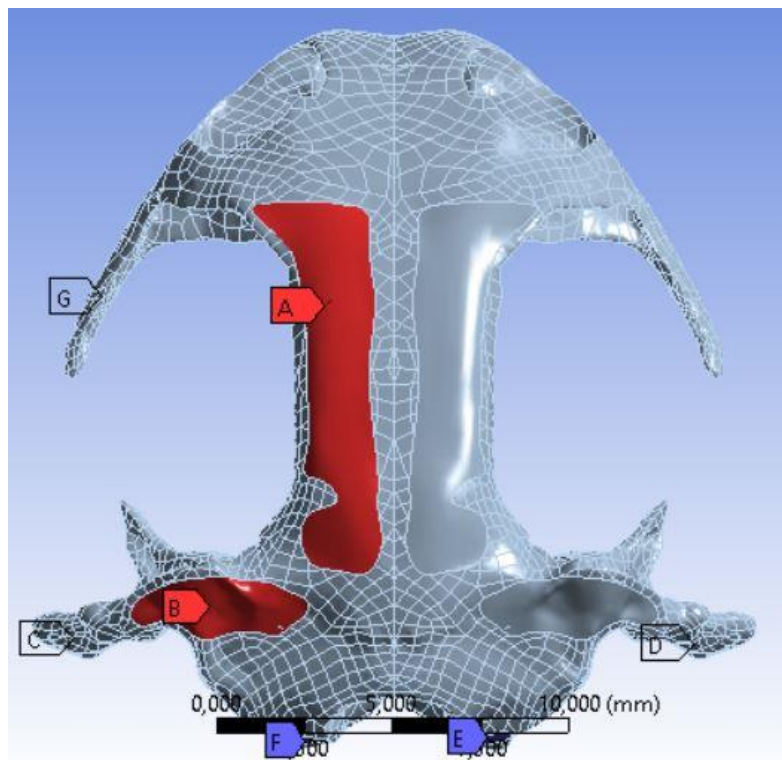


**Figura 5.40** Fuerzas y fijación mordida unilateral anterior desde arriba. Fuente: Propia





**Figura 5.41** Fuerza y fijación mordida unilateral posterior abajo. Fuente: Propia



**Figura 5.42** Fuerza y fijación mordida unilateral posterior arriba. Fuente: Propia

## 5.4 RESULTADOS

Una vez se han definido todas las características previas al estudio, y se han establecido todas las condiciones de contorno y sus respectivas fuerzas, se pasa a la realización del análisis mediante elementos finitos. En este estudio se han tenido en cuenta 4 tipos de mordida pero todos con la misma fijación, con un resultado de 4 análisis.

Los resultados que se han analizado han sido la deformación total y la tensión equivalente de Von Mises, guiado por el artículo (Josep Fortuny, Jordi Marcé Nogué et al., 2015), además el criterio de Von Mises es el más preciso para analizar materiales isotrópicos.

Por otro lado hemos aumentado el intervalo de los resultados obtenidos, para no realizar una interpretación errónea de la muestra.

### 5.4.1 Partes de la salamandra a la hora de mencionar

A la hora de estudiar los análisis se va a tener que destacar las zonas más afectada por lo que se va a definir las zonas del cráneo por su nombre.

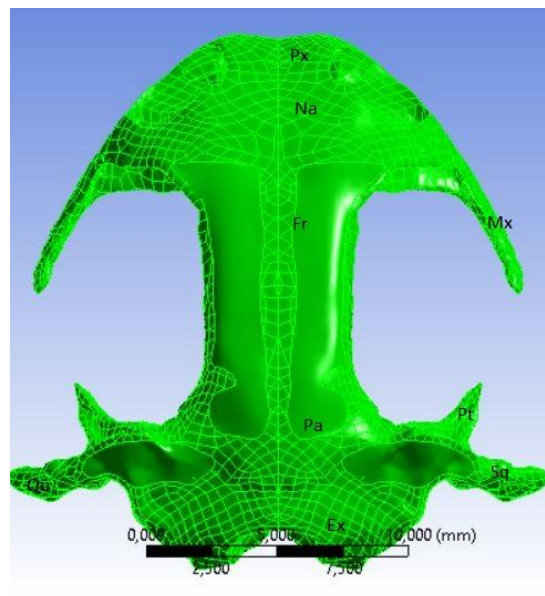


Figura 5.43 Nombre de las partes del cráneo. Fuente: Propia

ABREVIACIONES	NOMBRE COMPLETO
Px	Premaxilar
Na	Nasa
Fr	Frontal
Pa	Parietal
Ex	Exocipital
Pt	Pterigoideo
Sq	Squamosal
Qu	Cuadrado
Mx	Maxilar

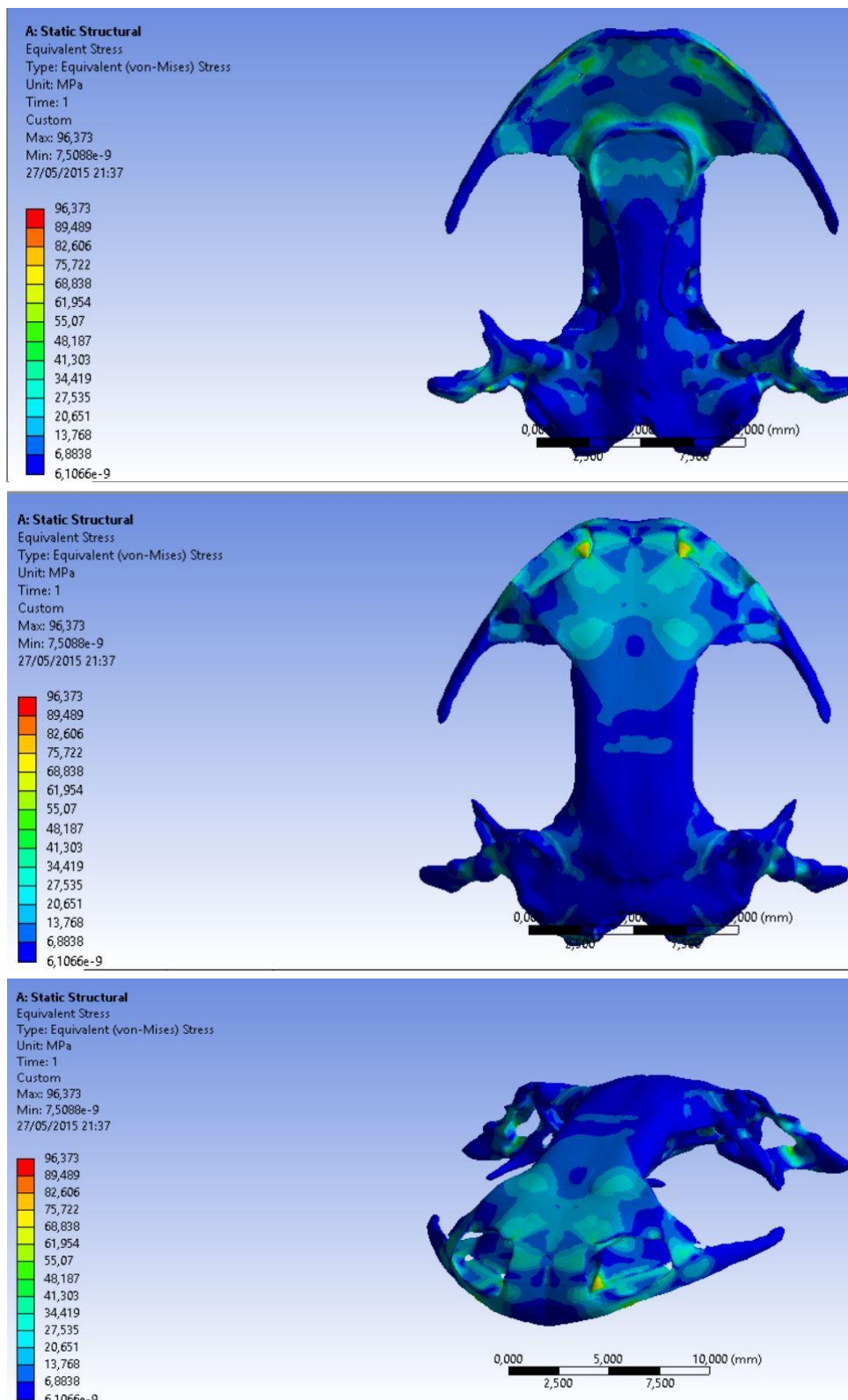
Tabla 5.4 Nombres de las partes del cráneo

## 5.4.2 Resultados de los análisis

### 5.4.2.1 Mordida bilateral anterior

En la figura se puede observar que al ser una mordida en la que intervienen las dos fijaciones de los dientes, esta es simétrica tanto en la distribución de esfuerzos como en la de deformaciones.

Se puede observar que las zonas de mayor esfuerzo se localizan en la zona de fijación de los dientes, así como también en la zona del vómer, que es el surco que tiene por debajo del cráneo. También se puede observar esfuerzos importantes en la zona nasal. Aunque las deformaciones máximas no se encuentran en las zonas con mayor esfuerzo, si no que se encuentra en la zona Frontal y en las terminaciones del maxilar.



**Figura 5.44** Tensiones mordida bilateral anterior. Fuente: Propia



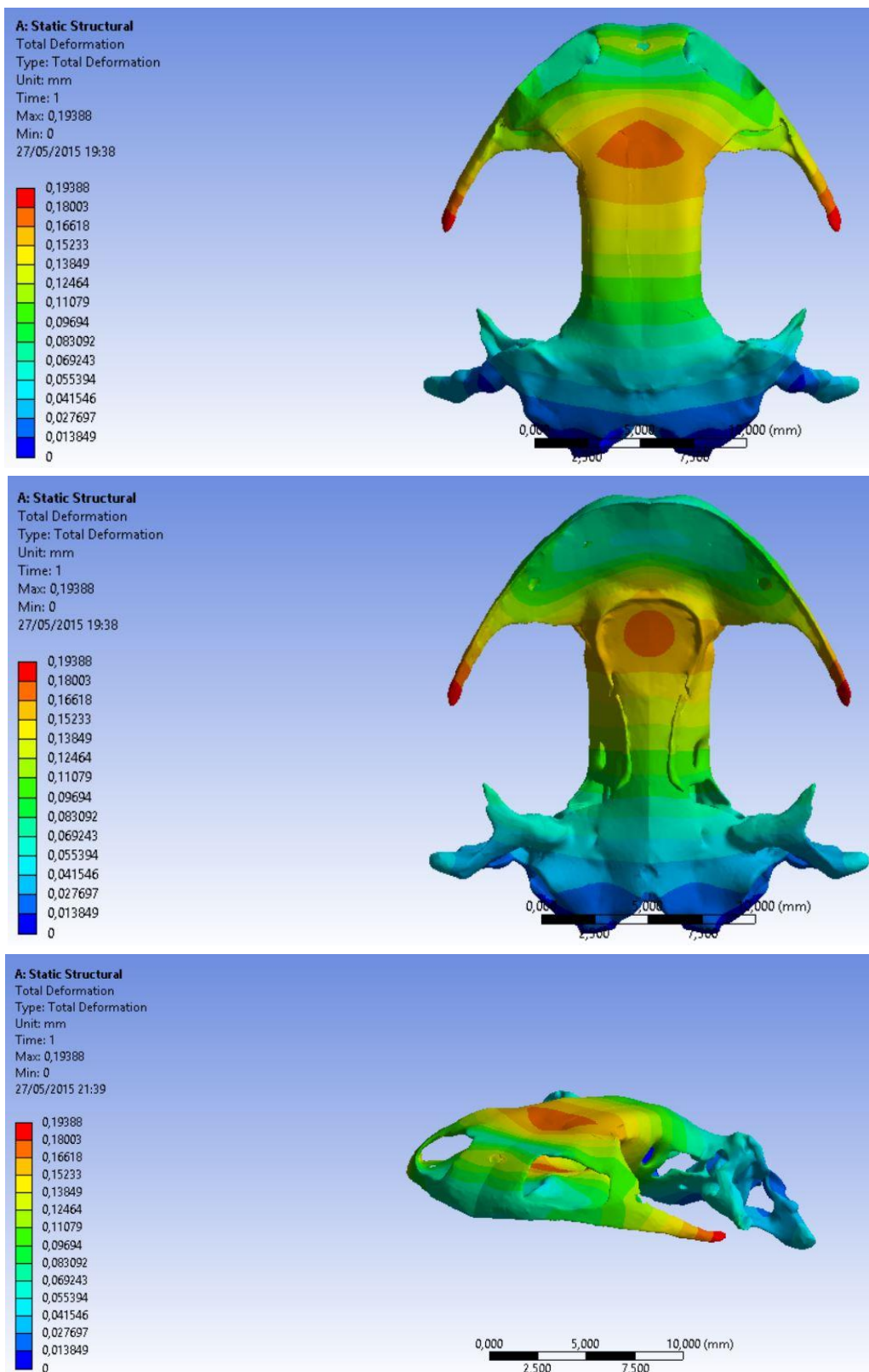
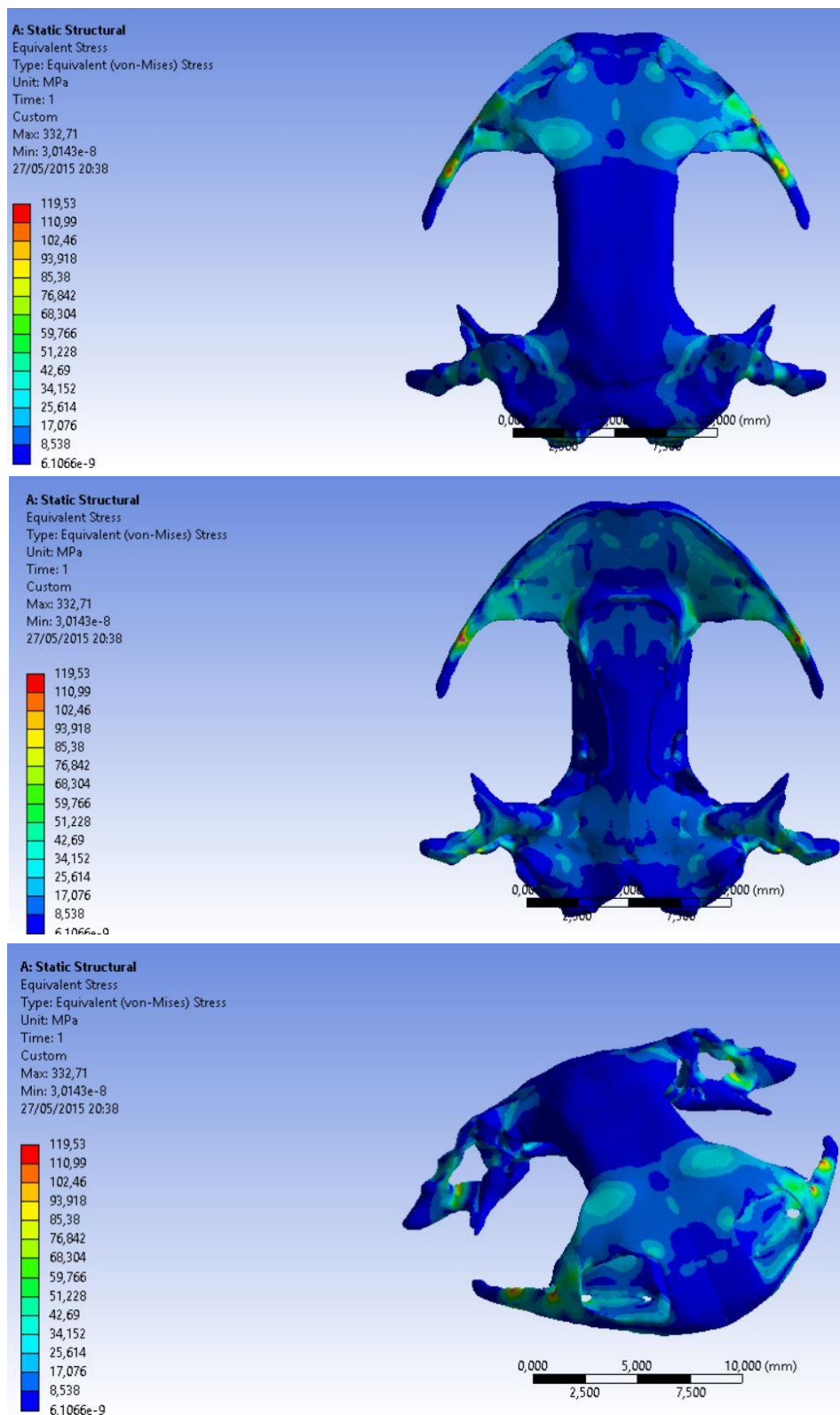


Figura 5.45 Deformación mordida bilateral. Fuente: Propia

#### 5.4.2.2 Mordida bilateral posterior

Aquí también se puede apreciar que las deformaciones y los esfuerzos también son simétricos. Se puede apreciar que las zonas de esfuerzos máximos se encuentran en las zonas de fijación, en la zona de los dientes posteriores y en una zona cercana a la de los dientes posteriores. También se puede ver un esfuerzo importante en la zona de pterigoideo. Como en el caso anterior, las deformaciones no se encuentran en las zonas de fijación si no que se encuentran en una zona bastante alejada, exactamente en la zona premaxilar y en la zona nasal.



**Figura 5.46** Esfuerzos mordida bilateral posterior. Fuente: Propia

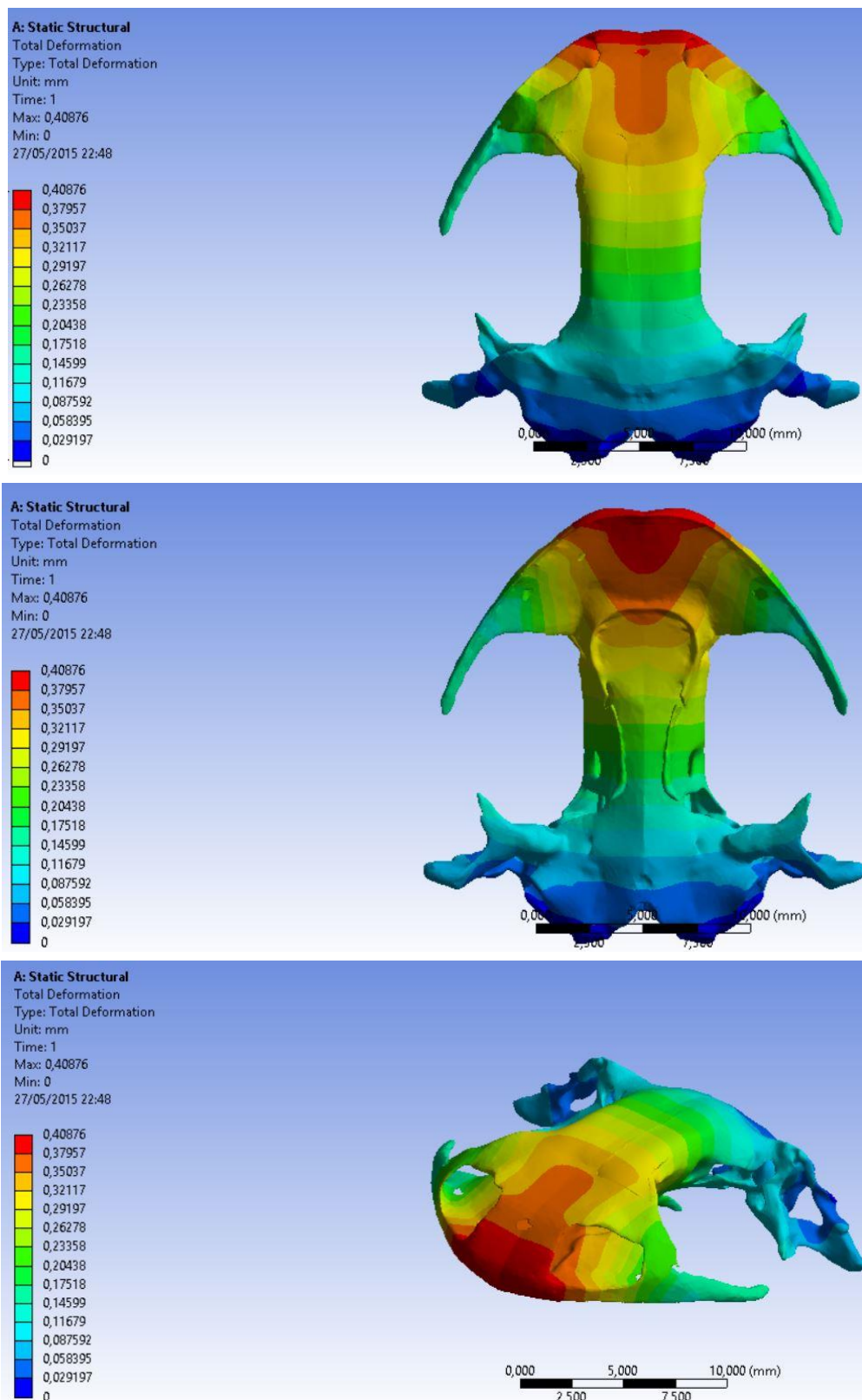


Figura 5.47 Deformaciones mordida bilateral posterior. Fuente: Propia

### 5.4.2.3 Mordida unilateral anterior

Se puede observar que en este caso al no ser una mordida simétrica como el caso anterior, las deformaciones y los esfuerzos tampoco son simétricos. Se ve en la imagen que las zonas de mayor esfuerzo se concentran en las zonas del cóndilo y en la zona de fijación del diente anterior, es decir las zonas de fijación.

En las deformaciones se puede observar que al no ser simétrico, la mayor deformación se aprecian en la zona izquierda que es donde se ha aplicado la fuerza para realizar la mordida. Se puede observar que en las zonas finales del maxilar y en la zona frontal izquierda es donde hay una deformación máxima.

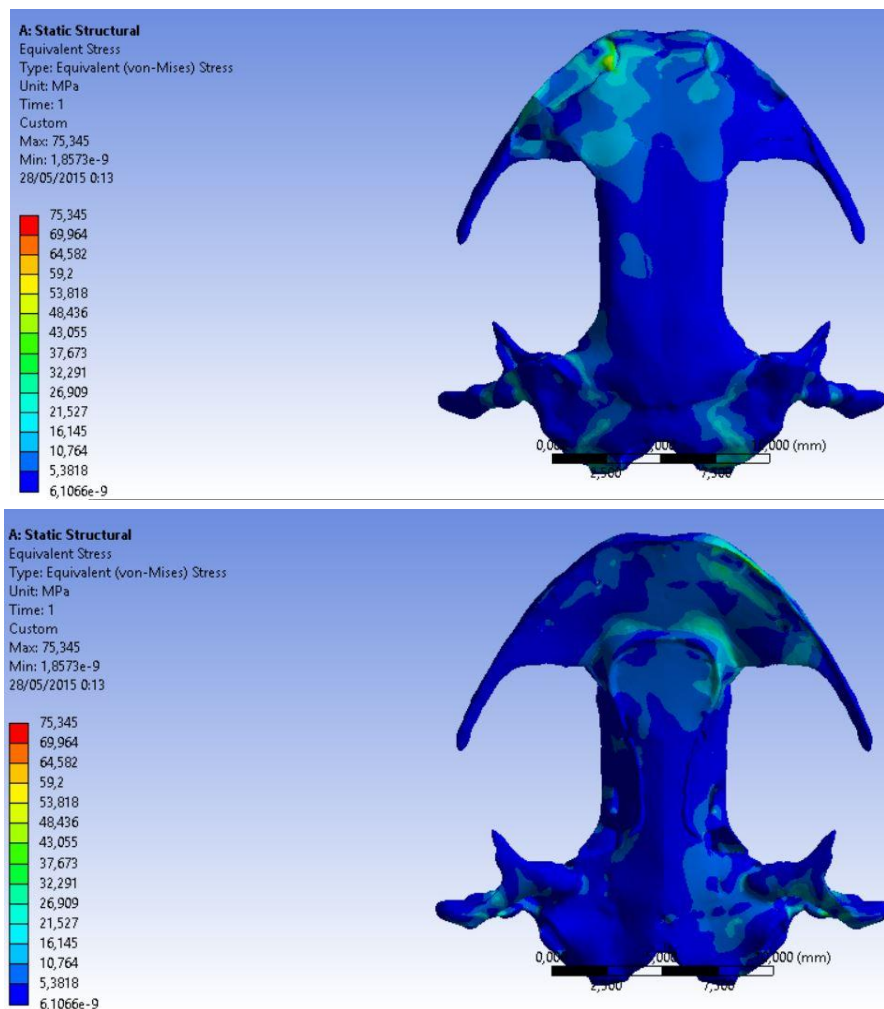


Figura 5.48 Esfuerzo mordida unilateral anterior. Fuente: Propia



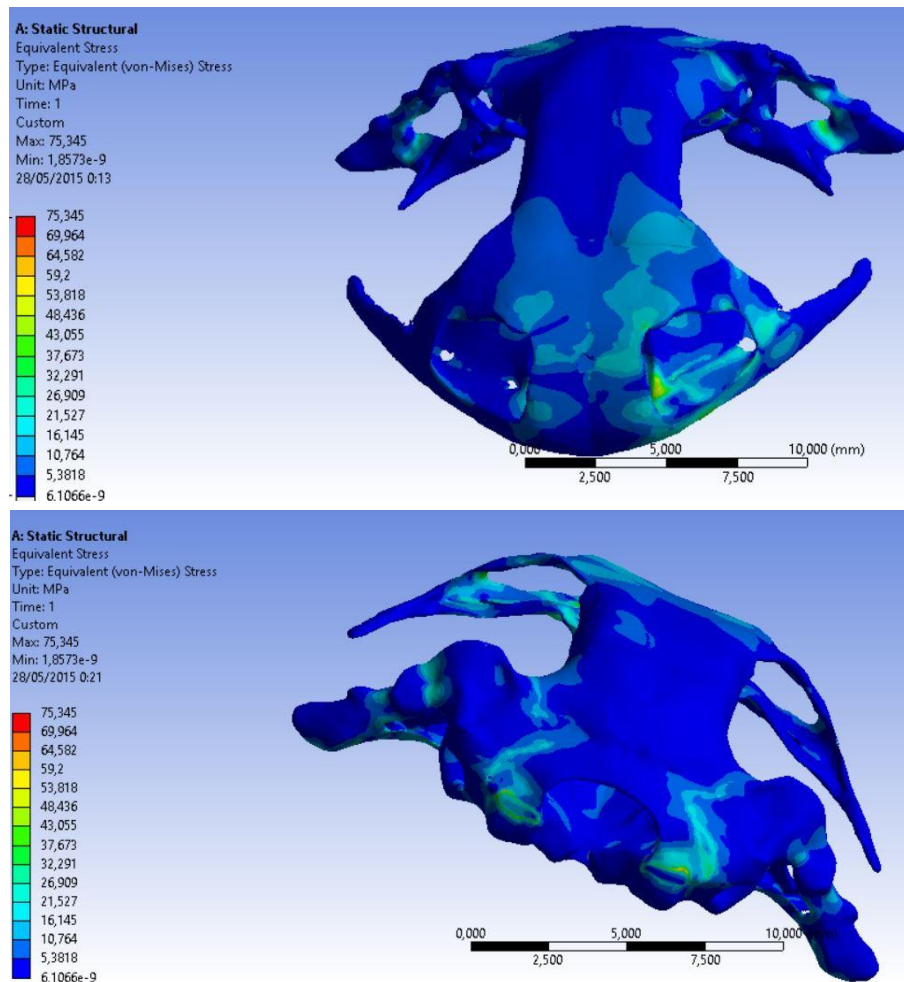


Figura 5.49 Esfuerzos II mordida unilateral anterior. Fuente: Propia

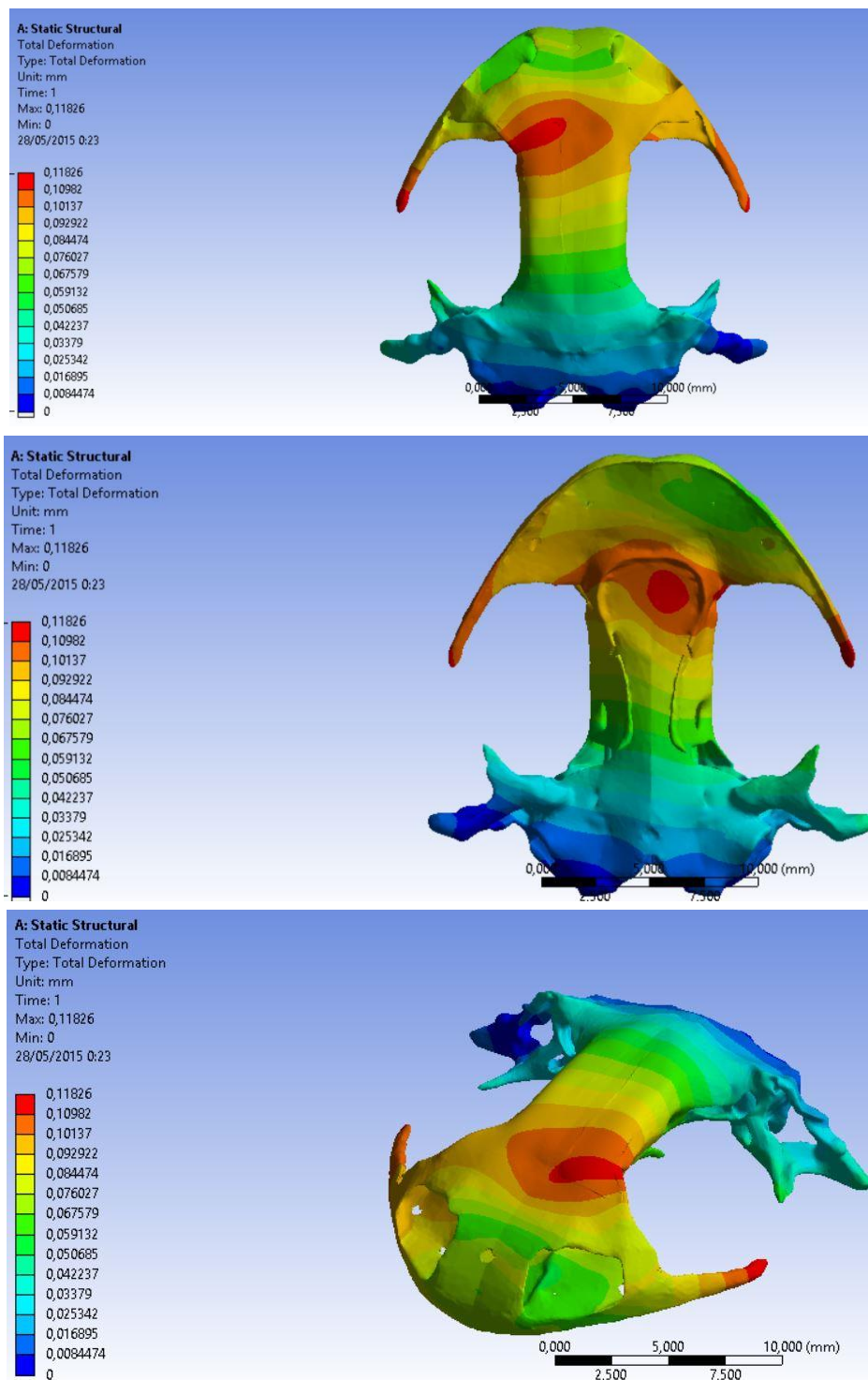


Figura 5.50 Deformación mordida unilateral anterior. Fuente: Propia

#### 5.4.2.4 Mordida unilateral posterior

Se puede observar como en el caos anterior que no hay simetría en las deformaciones y esfuerzos, los esfuerzos máximos se encuentran en las zonas de fijación. Las deformaciones tampoco son simétricas en este caso, y se encuentra alejadas de la zona e fijación, justo en el lado contrario. La zona premaxilar es donde se encuentra la mayor deformación.



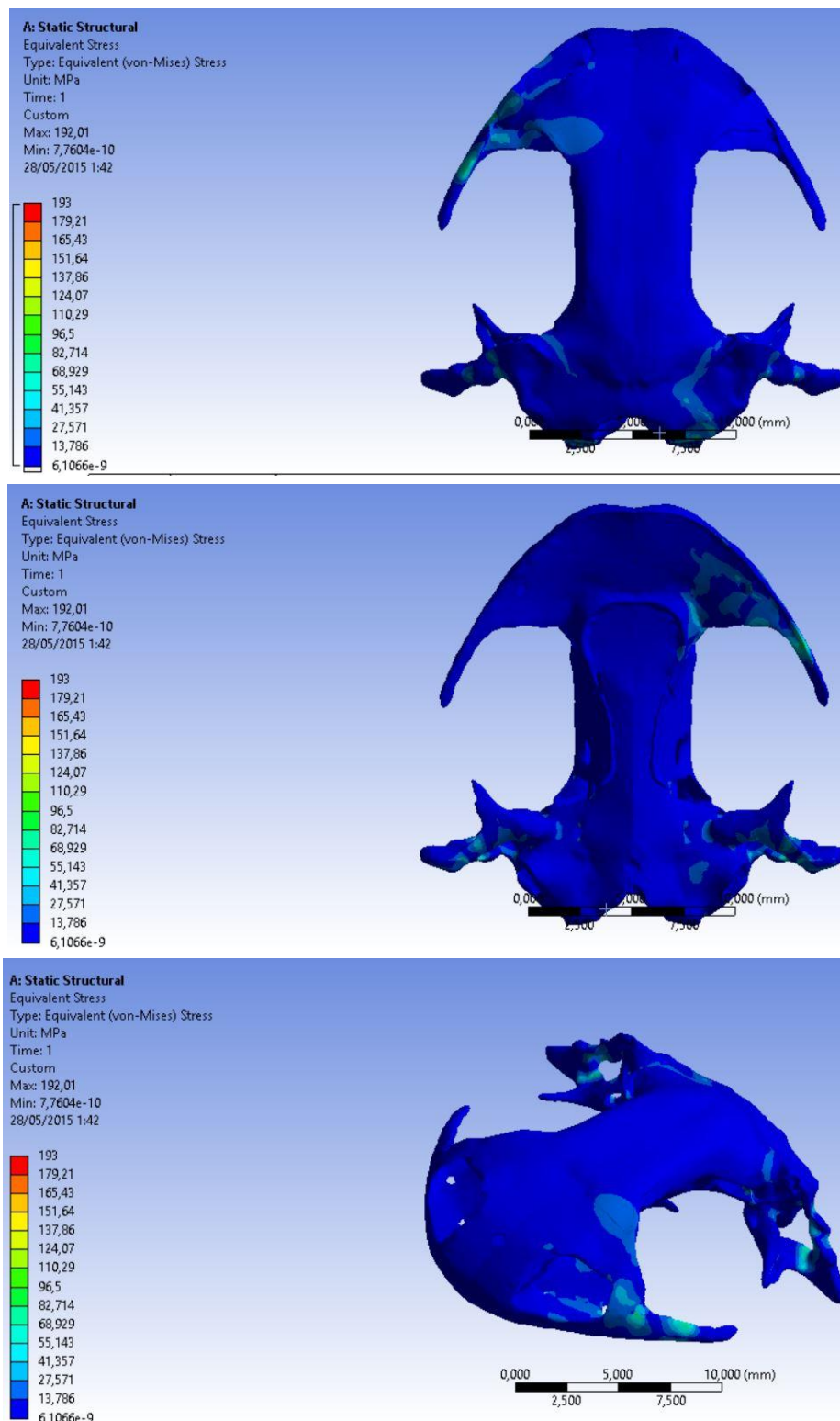


Figura 5.51 Esfuerzos mordida unilateral posterior. Fuente: Propia

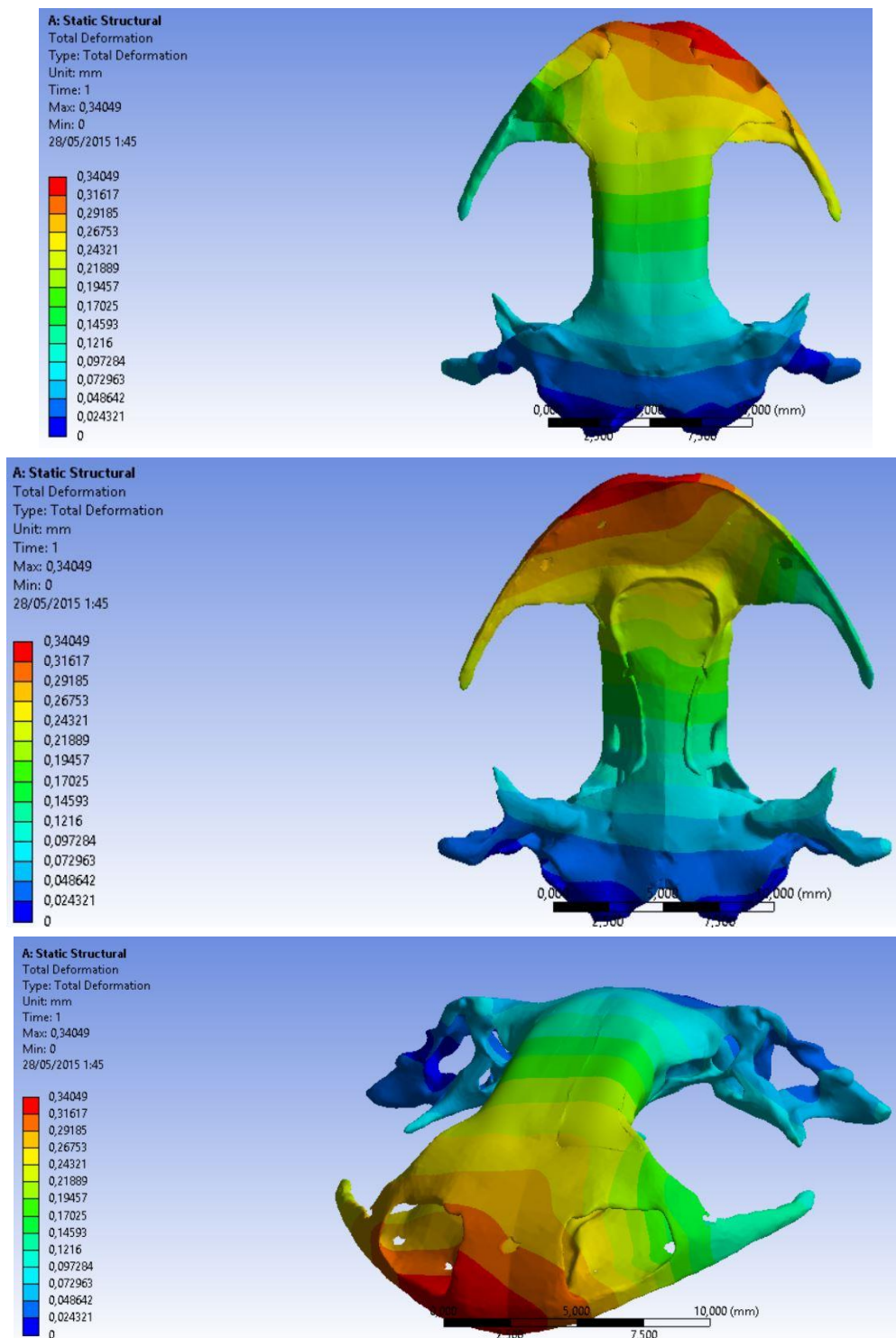


Figura 5.52 Deformaciones mordida unilateral posterior. Fuente: Propia

## 5.5 DISCUSION DE LOS RESULTADOS

En este estudio se han realizado 4 estudios de FEA, todos con las mismas fijaciones del cóndilo y la articulación de la mandíbula, pero se han tenido en cuenta diferentes tipos de mordida, así como cada tipo de mordida realizada con los diferentes tipos de diente usado por la salamandra. Se puede apreciar que en el caso de la mordida unilateral sin importar si es mordida anterior o posterior los esfuerzos son ligeramente mayores que en la mordida bilateral. Aunque haya diferencias entre un tipo de mordida y otra los resultados obtenidos han sido parecidos.

Aunque haya dos tipos de mordida bilateral y mordida unilateral, que dependiendo de la posición, hay una anterior y una posterior, se puede decir que el patrón de deformaciones y el de esfuerzos son iguales, sobre todo en la mordida bilateral, que se mantiene la simetría con respecto al centro. En el caso de la mordida unilateral las deformaciones se notan más al pasar de la mordida anterior a la posterior, ya que cambia un poco la zona de deformación.

En definitiva se puede decir que cada tipo de mordida presenta unas características que se pueden observar en las figuras al realizar el FEA. Podemos sacar en conclusión que en la mordida bilateral anterior la zona de máxima deformación se presenta en la zona frontal y en la zona donde termina el maxilar, en la mordida bilateral posterior la deformación máxima se puede encontrar en la zona nasal y premaxilar, mientras que en la mordida unilateral anterior se encuentra en la zona frontal izquierda y en las terminaciones del maxilar, en mordida unilateral posterior la deformación máxima se encuentra en la zona premaxilar.

## 6. PLANIFICACIÓN

En esta sección se muestran las tareas que hemos definido para el proyecto, así como la duración de las mismas y la terminación de ellas. De esta manera se puede analizar la duración aproximada de las tareas, con sus subdivisiones.

Este estudio, como es un estudio de un trabajo de final de grado le dedicaremos unas 300 h, tal y como mostraremos en la tabla de a continuación.

Código	Nombre de la tarea	Durada estimada (horas)	Inicio	Fin	Predecesoras
<b>A</b>	<b>Reunión con tutor</b>	<b>3h</b>	<b>3/02/2015</b>	<b>3/2/2015</b>	
<b>B</b>	<b>Estado del arte</b>	<b>30 h</b>	<b>4/2/2015</b>	<b>13/2/2015</b>	<b>A</b>
B.1	Adquisición de datos	15 h	4/2/2015	8/2/2015	
B.2	Análisis de elementos finitos	15 h	9/2/2015	13/2/2015	
<b>C</b>	<b>Aprendizaje de los softwares a utilizar</b>	<b>75 h</b>	<b>14/2/2015</b>	<b>10/3/2015</b>	
C.1	Aprendizaje del software Avizo	20 h	14/2/2015	20/2/2015	
C.2	Aprendizaje del software Geomagic	20 h	21/2/2015	26/2/2015	
C.3	Aprendizaje del software elementos finitos	35 h	27/2/2015	10/3/2015	
<b>D</b>	<b>Puesta en punto del modelo 3D</b>	<b>70 h</b>	<b>11/3/2015</b>	<b>5/4/2015</b>	

D.1	Reconstrucción modelo 3D	45 h	11/3/2015	25/3/2015	B.1,B.2, C.1
D.2	Posterior adaptación análisis modelo 3D	25 h	26/3/2015	5/4/2015	B.1,B.2, C.2
E	Zonas de inserción muscular	20 h	6/4/2015	12/4/2015	D.1,D.2
F	Análisis de elementos finitos	80 h	13/4/2015	8/5/2015	E
G	Análisis de resultados	41 h	9/5/2015	22/5/2015	F

Tabla 6.1 Tabla para el Gant

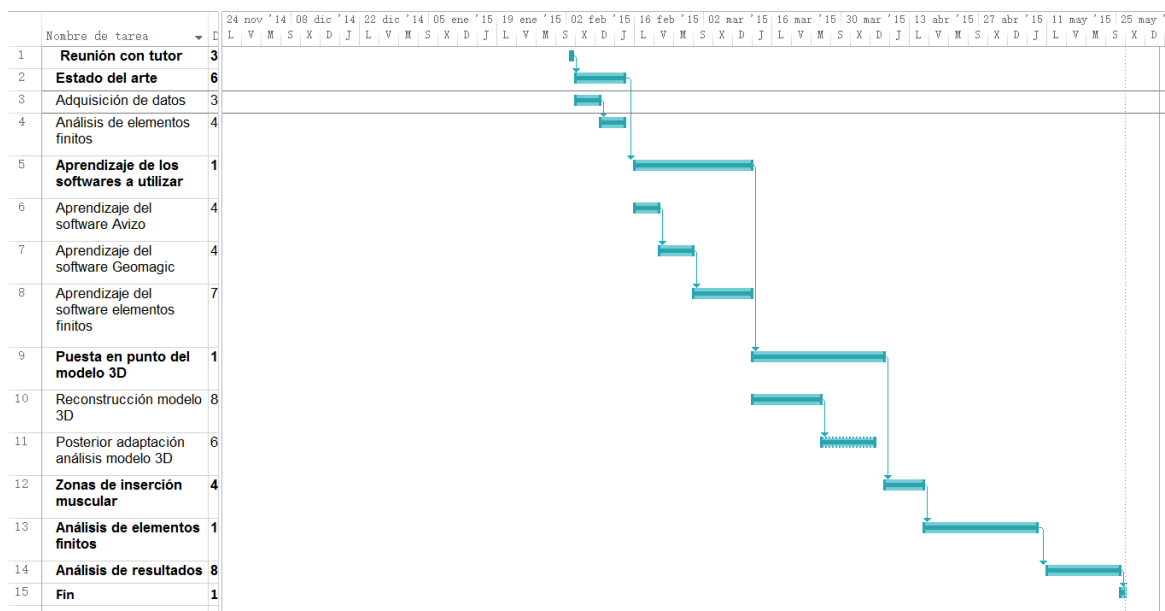


Figura 6.1 Gant. Fuente: Propia

## 7. CONCLUSIONES

En este estudio se ha realizado un estudio FEA, incluyendo la obtención de los datos hasta la reconstrucción del modelo hasta su posterior modelo para conseguir un modelo definitivo para el análisis. De esta manera se ha podido observar la evolución del uso del FEA, gracias a los grandes avances tecnológicos a la hora de obtener los datos y repararlos. Además se ha podido aprender el funcionamiento de los mecanismos de alimentación de una salamandra, aunque haya sido un estudio difícil debido a su difícil estructura, y a la dificultad de su reparación mediante el otro software GEOMAGIC STUDIO. Además con ANSYS® 15.0 se ha aprendido a reproducir los mecanismos de alimentación, desde la definición de un nuevo material hasta la reconstrucción de las áreas de la musculatura.

Se ha podido observar que con la restricción que se ha llevado a cabo, las mordidas bilaterales y unilaterales tiene distribución de tensiones y deformaciones diferentes, mientras que la bilateral tiene las tensiones y deformaciones simétricas, las unilaterales no lo son. A parte las zonas afectadas por la mordida bilateral suele ser una simetría en la zona frontal o nasal, mientras que en la mordida unilateral las deformaciones se suelen producir en un solo lado del cráneo, ya sea en la parte izquierda o derecha. Por eso hemos podido observar que cada mordida sigue su propio patrón.

Cabe destacar que se ha procedido a eliminar la comparación con otros tipos de reptiles de la misma especie, más que nada por la falta de tiempo, ya que la reconstrucción del animal ha llevado bastante tiempo en dejarla en su estado original, debido a que el archivo de datos del que se había sacado el modelo, el animal podría haber sufrido un gran golpe que le podría haber causado la muerte, y de allí que tuviera una gran grieta en la parte nasal.

Finalmente cabe destacar que este proyecto nos ayudará a entender mejor los mecanismos de alimentación de una salamandra, aunque solo sea una aproximación a la realidad, ya que realmente es difícil de determinar con exactitud.

## 8. BIBLIOGRAFÍA

### 8.1 PÁGINAS WEB

Información tomografía:

[http://es.wikipedia.org/wiki/Tomograf%C3%ADaxial\\_computarizada](http://es.wikipedia.org/wiki/Tomograf%C3%ADaxial_computarizada)

<http://www.cancer.gov/espanol/cancer/diagnostico-estadificacion/hoja-informativa-tomografia-computarizada>

Información salamandra:

<http://www.waza.org/es/zoo/elegir-una-especie/anfibios/salamandras-y-tritones/salamandra-salamandra>

<http://www.iucnredlist.org/details/59467/0>

### 8.2 PDF

*Salamandra salamandra* (Linnaeus, 1758). Salamandra común

### 8.3 Artículos

Doblaré, M., García, J. M., & Gómez, M. J. (2004). Modelling bone tissue fracture and healing: A review. *Engineering Fracture Mechanics*, 71, 1809–1840. doi:10.1016/j.engfracmech.2003.08.003

Rayfield, E. J. (2007). Finite Element Analysis and Understanding the Biomechanics and Evolution of Living and Fossil Organisms. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 35(1), 541–576. doi:10.1146/annurev.earth.35.031306.140104

- Dumont, E. R., Grosse, I. R., & Slater, G. J. (2009). Requirements for comparing the performance of finite element models of biological structures. *Journal of Theoretical Biology*, 256, 96–103. doi:10.1016/j.jtbi.2008.08.017
- Marcé-Nogué, J., Fortuny, J., Gil, L., & Galobart, A. (2011). Paper 237 Using Reverse Engineering to Reconstruct Tetrapod Skulls and Analyse its Feeding Behaviour. *Proceedings of the Thirteenth International Conference on Civil, Structural and Environmental Engineering Computing*. Civil-Comp Press.
- Marcé-Nogué, J., Demiguel, D., Fortuny, J., Esteban-trivigno, S. De, & Gil, L. (2013). Quasi-homothetic transformation for comparing the mechanical performance of planar models in biological research, 16(3).
- Josep Fortuny, Jordi Marcé-Nogué, Egon Heiss, Montserrat Sanchez, Lluís Gil, Àngel Galobart (2015). *3D Bite Modeling and Feeding Mechanics of the Largest Living Amphibian, the Chinese Giant Salamander Andrias davidianus (Amphibia: Urodela)*.
- Egon Heiss<sup>1</sup>, Nikolay Natchev, Michaela Gumpenberger<sup>3</sup>, Anton Weissenbacher<sup>4</sup> and Sam Van Wassenbergh (2013). *Biomechanics and hydrodynamics of prey capture in the Chinese giant salamander reveal a high-performance jaw-powered suction feeding mechanism*